



Р.В.Г. Хант

ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Шестое издание

Перевод с английского: А.Е. Шадрин

Оформление перевода сохраняет стиль оформления оригинального издания

По мнению переводчика, русскоязычный текст может быть открыт для широкого ознакомления, так как формально уже не является точной копией оригинального документа и не используется в коммерческих целях. Вместе с тем, поскольку оригинальный текст книги официально приобретен переводчиком в частное пользование, он оставляет за собой право распорядиться собственностью по личному усмотрению.

THE REPRODUCTION OF COLOUR

Sixth Edition

R.W.G. HUNT

Visiting Professor of Colour Science at the University of Derby
Formerly Assistant Director of Research, Kodak Limited, Harrow

When the rainbow appears in the clouds, I will see it and remember the everlasting covenant between Me and all living beings on earth.

Genesis 9:16

2004

Перевод: *А. Е. Шадрин*
Литературная редакция перевода: *А. В. Захарченко*

Средства машинного перевода и грамматической обработки текстов не применялись

ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

6-е издание

Р.В.Г. Хант

Нештатный профессор цветоведения университета Дерби

Заместитель директора по науке британского филиала
Eastman Kodak Company

И҆ бꙋ́детъ дꙋга̀ моѧ̀ во ѡ҆́блацѣ: и҆ ᲂу҆зрю̀ ю҆̀, є҆́же помѧнꙋ́ти завѣ́тъ вѣ́чный междꙋ̀ мно́ю и҆ землéю, и҆ междꙋ̀ всѧ́кою дꙋшéю живꙋ́щею во всѧ́кой пло́ти, ꙗ҆́же є҆́сть на землѝ.

Бы́т. 9:16

2009

ОТ ПЕРЕВОДЧИКА

Фундаментальный труд Роберта Ханта «Цветовоспроизведение», переизданный в 2004 г. шестой раз, по сей день остается лучшим пособием в подготовке *специалистов* индустрии изображений. Книга дает прочный понятийный фундамент, на котором сегодня за рубежом (в первую очередь — в США и Великобритании) строится профильное образование инженеров-технологов фотографии, полиграфии, кинематографии и телевидения. Логичность, системность и лаконизм изложения в сочетании с полнотой материала по праву позволяют назвать хантовскую работу классикой: просто, но в то же время подробно автор повествует об основных вехах в развитии нашей отрасли, умело и продуманно связывая ее психофизиологическую ипостась с ипостасью технологической. Иначе говоря, Хант предлагает вниманию будущих специалистов т.н. *междисциплинарный подход*, на котором начинают строиться (и, без сомнения, будут строиться далее) наука и технология XXI столетия, в частности наука и технология изображений.

По мнению переводчика, учебник Роберта Ханта не устареет даже спустя десятилетия, поскольку никогда не устареют достоверные знания о законах зрительного восприятия сцен и изображений сцен и поскольку непреходяща ценность технологической истории нашей отрасли, повествующей о пути, по которому на протяжении десятилетий шла инженерная и научная мысль, и о том, с какими трудностями приходилось сталкиваться исследователям и изобретателям со времен Максвелла до наших дней.

Итак, сказанное выше послужило мотивом к переводу материала на русский язык, а также к тому, чтобы рекомендовать «Цветовоспроизведение» в качестве одного из базовых учебных пособий студентов профильных вузов.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ СХЕМА ИЗУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА

- **Студентам профильных вузов** рекомендуется полное и тщательное изучение всех глав, в особенности с 1 по 11 включительно и с 30 по 37 включительно.

- **Фотографам** рекомендуется детальное изучение глав 5, 6, 10, 11, 18, а также с 30 по 33 включительно. К однократному прочтению рекомендуются главы 3, 4, 9, а также с 12 по 17 включительно.

- **Инженерам допечатной подготовки** рекомендуется детальное изучение глав 5, 6, 10, 11, 18, а также с 30 по 33 включительно. К однократному прочтению рекомендуются главы 3, 4, 9, а также с 26 по 29 включительно.

- **Дизайнерам и цветокорректорам** полиграфических и фотографических предприятий рекомендуется детальное изучение глав 5, 10, 11, 18. К однократному прочтению рекомендуются главы с 30 по 33 включительно.

Алексей Шадрин,
Санкт-Петербург, 2009 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сегодня, в XXI веке, цветовоспроизведение представляет собой высокотехнологичный процесс, в котором трансляция визуальных данных осуществляется посредством цифровых сигналов (причем уже не только на телевидении, но и в фотографии, и в полиграфии). В свое время очень серьезной преградой на пути развития цифровых технологий стала необходимость передачи огромного количества бит информации, заключенных в файле изображения. Преодоление этой преграды потребовало недюжинной изобретательности, в частности при разработке приемов компрессии данных. В итоге электронные фото- и видеокамеры стали давать адекватное разрешение при сравнительно небольшом битрейте, что в связке с современными методами печати (в частности, такими, как электрофотографическая и струйная технологии) позволило воспроизводить высококачественные цветные изображения на сравнительно недорогом оборудовании. Иными словами, явился такой феномен, как настольные издательские системы.

Однако, несмотря на появление множества технических новшеств, в основе работы любой цветовоспроизводящей системы по-прежнему лежит физиология зрительного восприятия человека. Физиология эта неизменна, но наше *понимание* механизмов зрения продолжает углубляться, по мере того как новые исследования проливают свет на малоизученные области. Таким образом, новейшее толкование целей и задач цветовоспроизведения требует не только описания новых технологий, но и нового взгляда на физиологию зрительного восприятия.

Шестая редакция нашей книги старается объединить оба эти направления: добавлены новые главы, призванные сделать издание максимально современным, а к ним — новые иллюстрации, разъясняющие суть описанных процессов. Все это — во имя обеспечения четкой и недвусмысленной связи теории с практикой.

Стоит отметить, однако, что бурное развитие цифровых технологий ничуть не умаляет значимости традиционной галогенсеребряной фотографии, аналогового телевидения и офсетной печати. Поэтому в текущей редакции оставлено полное описание традиционных методов цветовоспроизведения.

Главная цель нашей книги — вне зависимости от способа реализации (фотографического, телевизионного, полиграфического или электронного) сформулировать фундаментальные принципы цветовоспроизведения, дабы тот, кто в своей деятельности связан с изображениями, мог понимать природу явлений, с которыми сталкивается.

Итак, в первой части книги сформулированы основные принципы, работающие в любом отраслевом секторе индустрии изображений, тогда как три последующих части посвящены трем специфическим секторам: часть вторая — цветной фотографии; часть третья — телевидению и часть четвертая — полиграфии. В пятой части книги рассматриваются вопросы цифрового цветовоспроизведения, а в шестой — вопросы прогнозирования результатов цветового восприятия.

* * *

У цветовоспроизведения глубокие исторические корни: в начале XIX века эстонский физик Томас Сибек обнаружил, что хлористое серебро, экспонированное окрашенным светом, приобретает оттенок этого света, но при этом ощутимо меньшей визу-

альной интенсивности; в 1835 г. британский исследователь Роберт Хант (полный тезка автора данной книги) опубликовал третье издание своей знаменитой «Фотографии», где целая глава была посвящена «возможности воспроизводить цвета в их естественном виде» и где он описал несколько «Гелиохромов», которые «поначалу великолепно выглядели, но быстро увяли»; в 1890 г. Габриель Липпман не только усовершенствовал метод «фиксации» спектрального состава света на базе приемов традиционной черно-белой фотографии, но в целом серьезно развил технологию спектрального цветовоспроизведения, получив в итоге великолепные цветные снимки — «липпмановские фотографии».

Однако же Сибек и Липпман все-таки не стали предтечами современного цветовоспроизведения: честь и хвалу мы воздаем сегодня британскому физику Джеймсу Клерку Максвеллу, который на одной из своих знаменитых «вечерних лекций по пятницам» в Лондонской королевской научной ассоциации 17 мая 1861 г. продемонстрировал первую в истории человечества *трихроматическую* цветовую репродукцию. Сократив число переменных до трех, Максвелл заложил основы, на которых зиждется все современное практическое цветовоспроизведение. Поэтому для меня было огромной честью провести в одну из пятниц 1981 г. «вечернюю лекцию» по цветовоспроизведению, причем в той самой аудитории, в которой более века тому назад блистал сам Максвелл.

Технологии цветовоспроизведения развиваются бурно, но не стоит забывать, что человеческое цветовое зрение неизменно веками. Вильям Бенсон в своей монографии «Принципы науки о цвете» (опубликована Chapman&Hall в 1868 г.) приводит цитату из аристотелевской «Метеорологики»: «Цвета радуги — это цвета, которые живописцы готовить не умеют. Правда, некоторые удается получить смешением, но алый, зеленый и синий смесями никак не получаются; в радуге, между тем, именно эти цвета».[1] То есть цветовоспроизведение четвертого века до нашей эры сталкивалось с теми же трудностями, что и сегодняшнее!

Цветовоспроизведение — удивительная вещь: понимание его основ требует знания многих наук, искусств, эстетики; оно задействует самые разнообразные отрасли промышленности, требует изобретательности и изворотливости ума, но в своем высшем проявлении оно предельно просто: обычный взгляд на изображение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Цветовоспроизведение — это сфера, включающая в себя множество дисциплин и промышленных направлений. Изучить его в одиночку, т.е. без помощи соответствующих специалистов, — невозможно. Поэтому я в неоплатном долгу перед многими моими друзьями и коллегами, которых от всего сердца благодарю за помощь и поддержку.

Моя особая благодарность ныне покойному профессору В. Д. Райту, который в свое время привел меня в науку о цвете, чья экспериментальная тщательность, чей острый ум и энтузиазм были для меня источником подлинного вдохновения.

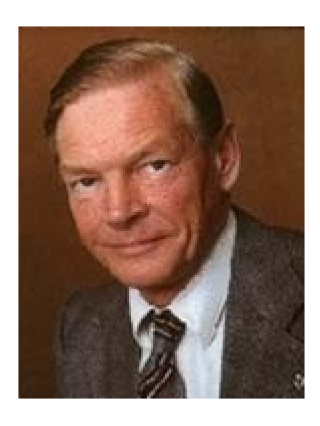
Все тридцать шесть лет работы в Kodak Research Laboratories — это период непрерывной учебы: своими выдающимися технологическими успехами в сфере производства фотоматериалов и в развитии процессов их обработки компания Kodak обязана

---

[1] Перевод с древнегреческого Н. В. Брагинской. — *Прим. пер.*

помимо прочего тому, что информация стекалась в ее научные лаборатории от многих смежных и малоизвестных компаний, и я совершенно не намерен умалять их вклад в развитие и процветание современной индустрии изображений.

Я хочу выразить особую признательность всем своим коллегам — сотрудникам Eastman Kodak Company, в частности Эду Бренеману, Эду Джиорджианни, Колину Хьюгу, Михаэлю Поинтеру, Феликсу Поллаку, Дэну Цвику, а также тем, кого, увы, уже нет с нами — Джиму Бартлесону, Рою Дэвису, Дэвиду Мак-Адаму, Ральфу Эвансу, Банни Хэнсону, Энтони Марриаж, а также Е. Сельвину, Д. Спенсеру и Джону Юлу.



Огромную пользу в углубленном изучении науки о цвете и цветовоспроизведении принесло мне общение с Роем Бернсом, Марком Фершильдом, Чанжином Ли, Роньером Луо, Луисом Сильверштайном и Фредом Билльмайером, а также покойными Дином Джаддом, Стенли Стивенсом, В. Стайлсом, Б. Кроуфордом и Гюнтером Вышецки.

Особая благодарность моему старому другу Михаэлю Поинтеру, помогавшему мне в проверке текстов. Наконец, бесконечная признательность моей супруге Элен за ее поддержку и помощь в подготовке издания к публикации.

Роберт Вильям Гайнер Хант,
2004 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ЧАСТЬ I
ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

ЧАСТЬ III
ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ

ЧАСТЬ V
МОДЕЛИ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

ПРИЛОЖЕНИЯ

Часть первая

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

1 СПЕКТРАЛЬНОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

1.1 ВВЕДЕНИЕ

Триста пятьдесят лет назад студент-физик Кембриджа[1] сказал бы: «Белое — это то, что по всем направлениям испускает мощный равномерно-чистый свет. Черное — это то, что совсем не испускает света или отдает его очень мало. Красное — это то, что испускает свет более чистый, чем обычно, но с теневыми промежутками. Синее — это то, что светится разреженным светом, поскольку состоит из перемешанных белых и черных частиц… Синий цвет моря возникает оттого, что белизна соли перемешивается с чернотой воды, в которой эта соль растворена» (Houston, 1923).[2]

Немудрено, что Поуп[3] написал в итоге:

Во тьме глубокой человек
Природы тайны постигал…
«Да будет Ньютон!» — Вышний рек,
И свет над миром просиял.

Когда в 1666 г. Ньютон обнаружил, что дневной (солнечный) свет — это смесь всех «цветов» спектра, он тем самым заложил краеугольный камень науки о цвете. Это открытие стало также и отправной точкой рассуждений об основных принципах цветовоспроизведения.

1.2 СПЕКТР

Представим себе, что мы держим в руках цветную фотографию улицы, сделанную солнечным днем: весь свет, падающий на улицу, исходит от солнца — либо непосредственно (если небо ясно), либо будучи рассеянным облаками (если пасмурно), либо рассеянным атмосферой (при освещении только ясным небом). Известно, что солнечный свет — это «смесь» всех «цветов» спектра. Некоторые компоненты этой «смеси» отражаются природными объектами: так, например, листва содержит хлорофилл[4], благодаря которому лист, освещенный дневным светом, подавляет «красные», «желтые» и «синие» компоненты этого света, вследствие чего в глаз попадают только «зеленые» компоненты, и мы говорим, что листва зеленая. Аналогично помидоры, выставленные в витрине овощного магазина, выглядят красными, поскольку поглощают бóльшую часть «синих», «зеленых» и «желтых» компонентов дневного света, отражая при этом

---

[1] Кембридж (англ. *Cambridge*) — город на востоке Англии, административный центр графства, один из старейших университетских центров Европы. — *Прим. пер.*

[2] Ссылки находятся в конце глав и идентифицируются по автору и году издания.

[3] Александр Поуп — английский поэт первой половины XVIII в. — *Прим. пер.*

[4] Хлорофилл — пигмент, поглощающий преимущественно «красный», «желтый» и «синий» света, но пропускающий «зеленый».

в основном «красные» компоненты. Таким образом, совершенно ясно, что и качество осветителя, и характер объектов вносят свой вклад в цветовое восприятие.

Если вечером мы выйдем на улицу, освещенную натриевыми лампами, то обнаружим, что и листья, и помидоры стали коричневыми, поскольку освещение содержит теперь только «желтый» свет, поглощаемый листвой и помидорами, а «зеленого» света, отражаемого листвой, равно как и «красного» света, отражаемого помидорами, нет, в результате чего не может возникнуть и соответствующих цветовых ощущений.

Однако натриевая лампа с ее необычным светом — вещь исключительная, большинство же источников света подобны солнцу, так как испускают смесь излучений всех «цветов» спектра (сказанное справедливо в отношении ламп накаливания, электронных фотовспышек и большинства флуоресцентных ламп), при этом степень, с которой разные предметы отражают спектральные «цвета», дает возможность весьма ценного измерения цветовых свойств самого спектра.

До сего момента мы весьма вольно рассуждали о «красном», «желтом», «зеленом» и «синем» светах, не указывая при этом точно, к какой именно части спектра они принадлежат. Поскольку любой свет имеет волно-зависимые свойства и свет различных частей спектра согласован с волнами различных длин, то каждый спектральный «цвет» удобно определять через длину волны его света.

Все длины волн запредельно коротки, и удобными единицами их измерения являются:

— микроны, или микрометры (μm), составляющие миллионную долю метра;

— миллимикроны, или нанометры (mμ), — тысячные доли микрона, то есть миллиардные (10^{-9}) метра;

— ангстремы (A), составляющие одну десятитысячную микрона.

Мы будем пользоваться преимущественно нанометрами.

Основные спектральные «цвета» занимают участки со следующими длинами волн: «фиолет» — 450 нм и ниже, «синий» — от 450 до 480 нм, «сине-зеленый» — от 480 до

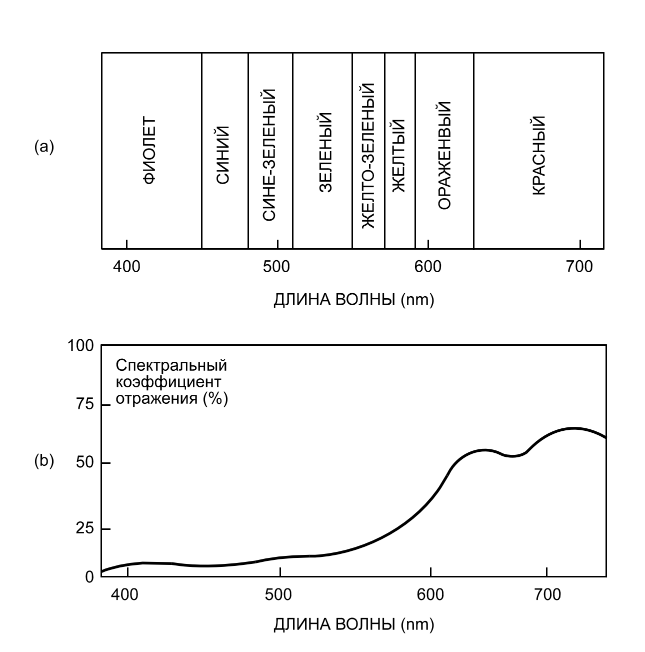


Рис. 1.1 (a) Распределение «цветов» спектра; (b) Кривая спектрального коэффициента отражения красного цветового пачта.

510 нм, «зеленый» — от 510 до 550 нм, «желто-зеленый» — от 550 до 570 нм, «желтый» — от 570 до 590 нм, «оранжевый» — от 590 до 630 нм, «красный» — от 630 и выше (рис. 1.1 [a]). На протяжении всего спектра «цвета» плавно переходят один в другой, и то, где кончается восприятие одного и начинается восприятие другого, во многом зависит от условий просмотра.

На рис. 1.1 (b) даны величины энергии отраженного света в процентном выражении от общего количества света, упавшего на красную поверхность. Кривая, полученная таким путем, именуется кривой спектрального коэффициента отражения образца и дает детальное описание цветовых свойств поверхности. В нашем случае красного света отразилось 65%, оранжевого — 55%, желтого — 30%, желто-зеленого — 15%, зеленого — 10%, сине-зеленого — 10%, синего — 5% и фиолетового — 5%. Данные спектральные коэффициенты отражения определяют специфический красный цвет исследуемой поверхности, которая на самом деле является поверхностью помидора.

Теперь рассмотрим цветную фотографию того же помидора как некий цветовой патч. Очевидно, что если последний будет иметь такую же кривую спектрального коэффициента отражения, что и сам помидор, то физически оба «цвета» будут одинаковыми. Следовательно, и восприниматься в одних и тех же условиях просмотра они будут одинаково. Таким образом, если оригинал и репродукция, находящиеся в одинаковых окружениях, будут рассматриваться вначале при солнечном свете, затем при свете ламп накаливания, а затем, скажем, при свете натриевых ламп — то во всех трех случаях они будут выглядеть одинаково (более того: они будут одинаковыми в восприятии их животными и цветослепыми людьми), хотя, конечно, оба будут менять свой цвет при смене осветителя. Цветовоспроизведение в данном случае было бы, как говорят, спектрально корректным, но на практике весьма трудноосуществимым.

Существует два способа спектрального цветовоспроизведения (оба относятся к цветной фотографии): *микродисперсионный метод* и *метод Липпмана*.

1.3 МИКРОДИСПЕРСИОННЫЙ МЕТОД

Микродисперсионный метод схематически представлен на рис. 1.2: объектив фотокамеры фокусирует изображение сцены на грубой решетке, состоящей из чередующихся, параллельных друг другу, щелей и прутьев (с одинаковой частотой 300 lpi). Большая плоско-выпуклая линза собирает свет от всех щелей и посылает его сквозь

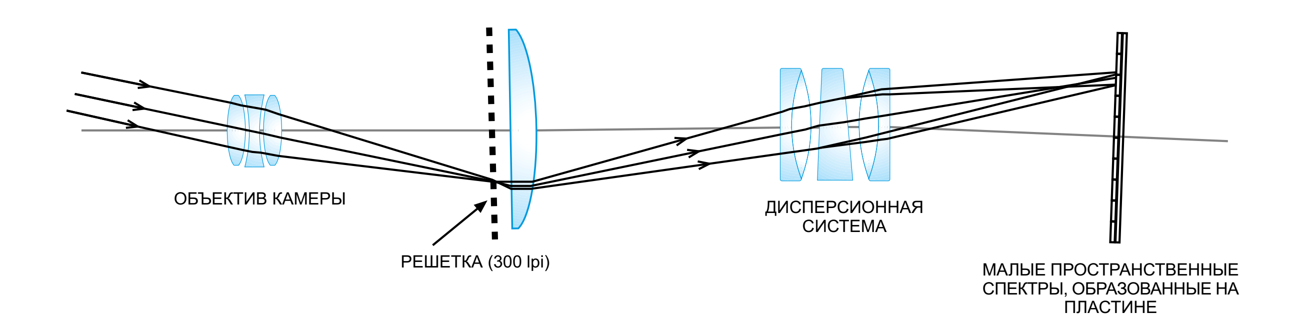


Рис. 1.2 Микродисперсионный метод цветной фотографии (схематично).

узко-угловую призму. Линзы, стоящие по обе стороны от призмы, фокусируют изображение на фотопластине. Изображение при этом состоит из полос, каждая из которых разложена призмой на т.н. *малый пространственный спектр*. Таким образом, коль скоро свет от каждого элемента регистрируемой сцены[1] развертывается в отдельный спектр, пластиной фиксируется информация о кривой спектрального коэффициента отражения каждого из этих элементов.

Пластину проявляют обычным путем, а позитивный отпечаток выполняют на другой пластине (или, альтернативно, обращают оригинальный фотоматериал). Таким образом, позитив содержит спектры, взаимопозиции которых строго соответствуют взаимопозициям спектров реальной сцены.

Пропустив белый свет в обратном направлении (справа налево по рис. 1.2) и используя объектив камеры как проекционный, можно получить цветовую репродукцию сцены, в которой каждый элемент изображения будет иметь ту же кривую спектрального коэффициента отражения, что и в оригинале.[2]

1.3.1 Недостатки микродисперсионного метода

Недостатки микродисперсионного метода очевидны: необходимое оборудование громоздко и дорого, решетка снижает интенсивность света, а необходимая сверхмелкозернистая эмульсия низкочувствительна, отчего регистрация спектров занимает минуты. Однако метод интересен тем, что дает спектрально точную репродукцию.

1.4 МЕТОД ЛИППМАНА

Еще один цветофотографический метод, дающий спектрально точную репродукцию, представляет собой одно из самых изящных изобретений в истории фотографии: в 1891 г. парижский профессор Габриэль Липпман[3] с помощью специальной техники получил фотоэмульсию с зернами (кристаллами галоидного серебра) всего лишь 0.01—0.04 μm в диаметре. Эту эмульсию он нанес на пластины, которые экспонировались обычной фотокамерой — обычной, за исключением того, что эмульсионная сторона пластины была расположена под непрямым углом к оптической оси объектива; с обратной стороны пластины наливался слой ртути (см. рис. 1.3 [a]).

Ртутно-эмульсионная граница работала как зеркало, в результате чего падающие и отраженные световые волны интерферировали друг с другом и образовывали на эмульсии стоячую волну. Участок стоячей волны регистрировался эмульсионным слоем пластины в виде скрытого изображения, и после проявки в эмульсии образовывалась некая последовательность слоев восстановленного серебра. Толщина слоя была равна

---

1 Элемент сцены — это отраженный от того или иного объекта сцены световой поток, угловой размер которого лежит сразу над порогом пространственного различения. — *Прим. пер.*

2 Здесь автор допускает серьезную неточность: спектральный коэффициент отражения экрана останется неизменным, поскольку спектральный коэффициент отражения поверхностей не зависит от состава падающего света; вероятнее всего, автор имел в виду то, что, пропуская свет в обратном направлении, мы получим то же самое спектральное распределение энергии цветовых стимулов, что и в оригинальной сцене, освещенной тем же светом. — *Прим. пер.*

3 Габриэль Липпман (фр. *Gabriel Lippmann*, 16 августа 1845, Холлерих, Люксембург — 13 июля 1921) — французский ученый, лауреат Нобелевской премии по физике 1908 г. «за создание метода фотографического воспроизведения цветов на основе явления интерференции». — *Прим. пер.*

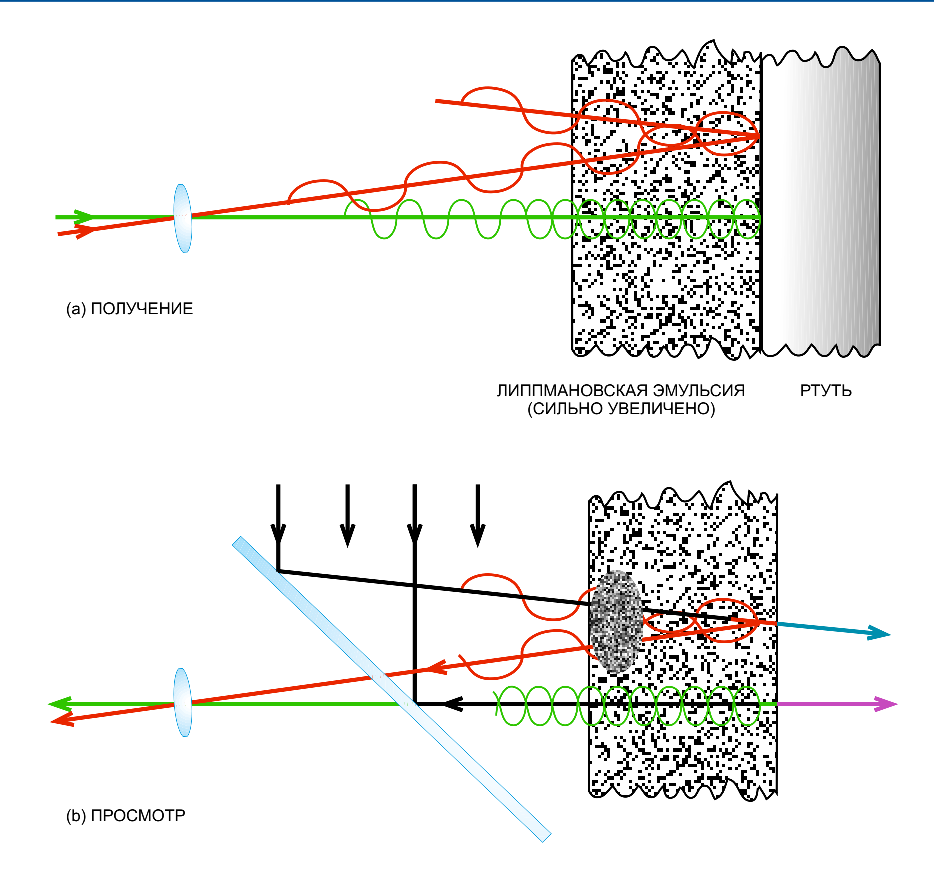


Рис. 1.3 Липпмановский метод цветной фотографии (схематично).

половине длины волны экспонирующего света. Чувствительность эмульсии по всему спектральному диапазону обеспечивалась за счет специальных сенсибилизирующих красителей (Eder, 1945).

Поскольку красный свет имеет бóльшую длину волны, нежели зеленый, слои серебра, активированного красным лучом (наклонная линия на рис. 1.3 [a]), находятся друг от друга на большем расстоянии, чем слои серебра, активированные зеленым лучом (горизонтальная линия на рис. 1.3 [a]).

После обработки негативная пластина рассматривалась в отраженном свете (рис. 1.3 [b]). В получении позитива путем обращения не было необходимости, поскольку проявленные серебряные слои негатива имели очень мелкое зерно и при просмотре в отраженном свете давали позитивное изображение. Более того: полученное позитивное изображение было цветным, поскольку серебряные пластины эффективно отражали свет только с теми длинами полуволн, что были равны расстоянию между слоями, и весьма слабо отражали (или даже совсем не отражали) свет с иными длинами волн. Следовательно, все монохроматические цветовые стимулы[1] (равно как и прочие) воспроизводились со спектрально точной цветопередачей.

---

[1] Чтобы согласовать индивидуальную лексику автора с общепринятой колориметрической терминологией, слово «colour» здесь и далее будет переводиться контекстно, то есть: либо как «цветовой стимул», если речь идет о физическом факторе, вызывающем цветовое ощущение, либо как «цвет» («цветовое ощущение»), если речь идет о цветовом восприятии зрительного стимула. — *Прим. пер.*

1.4.1 Недостатки липпмановского метода

Профессор Липпман и его последователи выполнили множество великолепных цветных фотографий. Вероятно, липпмановский метод — это самый элегантный способ спектрального репродуцирования, который когда-либо был придуман. Впрочем, у него есть существенные недостатки:

— во-первых, липпмановские эмульсии сверхмелкозернисты, а значит, и сверхнизкочувствительны, — в результате, чтобы выполнить цветную фотографию, даже на солнечном свету требуется несколько *минут* экспозиции. Использовать высокочувствительную эмульсию невозможно, поскольку период регистрируемой интерференционной картины в этом случае оказывается меньше, чем размер зерна высокочувствительной эмульсии;

— во-вторых, поскольку липпмановские фотографии необходимо рассматривать в отраженном свете, их трудно проектировать на экран, но даже когда их рассматривают в строго отраженном свете, критичен угол просмотра (Nareid, 1998).

1.5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИДЕНТИЧНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

В ряде случаев воспроизвести спектральный коэффициент отражения поверхности удается за счет использования красителей, сходных с теми, какими окрашены оригинальные объекты. Так, например, текстильщики при воспроизведении того или иного цвета на неокрашенном материале могут получить спектрально корректную цветовую репродукцию, если будут использовать те же самые краски и в тех же количествах, что в оригинале. В нашей книге, однако, термин «*цветовоспроизведение*» (*color reproduction*) в основном будет употребляться в смысле «получение изображений сцен», поскольку использование идентичных красок возможно только в определенных случаях, в частности при копировании цветных фотографий или отпечатков (подробно см. раздел 15.7).

1.6 ПРИБЛИЗИТЕЛЬНОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

При использовании шести (и более) разнотоновых красок, чернил или пигментов становится возможным получение цветовой репродукции, спектральный состав которой аппроксимирует большинство оригиналов (Taplin и Berns, 2001). Этот принцип — принцип приблизительного спектрального цветовоспроизведения — расширяет цветовой охват воспроизводимых стимулов, что иногда используется при копировании произведений живописи (см. раздел 28.16), плюс к тому, он позволяет минимизировать цветоискажения при использовании осветителей с разной цветностью, что, в частности, критично при издании товарных каталогов.

1.7 УПРОЩЕННЫЙ ПОДХОД

Неудивительно, что трудности, свойственные микродисперсионному и липпмановскому методам, делают эти методы совершенно непопулярными, да и использование более чем шести колорантов также весьма проблематично. Более того, ни один из современных методов цветовоспроизведения не работал бы, если бы человеческое зрение не обладало свойством существенно снижать сложность воспринимаемых цветовых

стимулов. Поэтому оставшаяся часть нашей книги посвящена описанию принципов и методов получения цветовых репродукций, основанных на радикально более простом подходе: несмотря на то что в спектре «работают» волны каждой из возможных длин, суммарный эффект от них (в случае человеческого зрения) объединяется всего лишь в три группы.

Хотя данный упрощенный подход лежит в основе цветовоспроизведения в фотографии, телевидении и печати (и применяется весьма успешно), мы видим, что должное понимание его зачастую требует весьма серьезных усилий. Поэтому при первом знакомстве с материалом мы рекомендуем опустить главы 8, 9, 15, 16, 17 и 22.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Houston, R.A., Light and Colour, p. 5, Longmans Green & Co., London (1923).

Eder, J.M., History of Photography, Columbia University Press, New York, pp. 668–670 (1945).

Nareid, H., J. Phot. Sci., 36, 140 (1988).

Taplin, L.A., and Berns, R.S., IS&T and SID's 9th Color Imaging Conference, Color Science and Engineering.

Systems, Technologies, Applications, page 209. IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (2001).

ЛИТЕРАТУРА

Berns, R.S., Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, 3rd Edn., Wiley, New York (2000).

Coote, J.H., The Illustrated History of Colour Photography, Fountain Press, Kingston-upon-Thames (1993).

Evans, R.M., An Introduction to Color, Wiley, New York (1948).

Friedman, J.S., History of Color Photography, Chapter 3, American Photographic Publishing Co., Boston (1944).

Hunt, R.W.G., Measuring Colour, 3rd Edn., Fountain Press, Kingston-upon-Thames (1998).

Le Grand, Y., Light, Colour, and Vision, 2nd Edn., Chapman & Hall, London (1968).

Murray, H.D., Colour in Theory and Practice, Chapman & Hall, London (1952).

Smith, R.C., Colour Photography, p. 137 (April, 1962).

Smith, R.C., Brit. J. Phot., 114, 1122 (1967).

Wright, W.D., The Measurement of Colour, 4th Edn., Hilger, London (1969).

2 ТРИХРОМАТИЧЕСКОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ И АДДИТИВНЫЙ ПРИНЦИП

2.1 ВВЕДЕНИЕ

На протяжении XVII-го и XVIII-го веков версия тройственной природы цвета неуклонно крепла, и в 1722 г. Жакоб Кристофель Леблон впервые применил т.н. «трехцветную» (*трихроматическую*) печать (Weale, 1957; Wall, 1925; Birren, 1981). Около 1807 года Томас Юнг инструментально подтвердил тот факт, что сетчатка человеческого глаза отвечает за цветовое триединство стимулов реальных сцен, а в 1861 г. Джеймс Клерк Максвелл получил первую трихроматическую цветную фотографию, и, что примечательно, отнюдь не в личных интересах, но в качестве иллюстрации тройственной природы цветового зрения (Maxwell, 1858—1862).

2.2 МЕТОД МАКСВЕЛЛА

Максвелловский метод лежит в основе всех современных систем цветовоспроизведения. Ученый взял три негатива: один, выполненный за красным фильтром, второй — за зеленым, и третий — за синим, сделал с них три позитивных слайда, которые затем установил перед тремя отдельными проекторами, подававшими все три изображения на белый экран (рис. 2.1). Перед проектором, в котором был закреплен слайд, полученный с «красного» негатива, был установлен красный фильтр; перед проекторами, в которых закреплялись слайды, полученные с «зеленого» и «синего» негативов, — соответственно зеленый и синий фильтры. В результате на экране возникала цветовая репродукция оригинала. Физически все цветовые стимулы, отраженные от экрана, были лишь смесью красного, зеленого и синего световых потоков, но зрение воспринимало их как белый, желтый, оранжевый, сиреневый и т.п. Фактически полный диапазон ненасыщенных и насыщенных цветов воспринимался как дополнение к красному, зеленому и синему.

Сегодняшнее цветовоспроизведение, реализуемое в фотографии, телевидении и печати, имеет весьма мало общего с методом Максвелла, но сам *принцип* воспроизведения, воплощаемый через разновеликие смеси красного, зеленого и синего световых потоков, остается универсальным. Стоит сказать, что тройное проектирование в совокупности с современными технологическими возможностями (triple projection) дает результаты высочайшего качества.

В течение многих лет оставалось загадкой то, как именно Максвелл смог получить изображения за красным и зеленым фильтрами, поскольку его фотоматериалы были чувствительны лишь к коротковолновому (синему) свету, а возможность расширять чувствительность до зеленой и красной областей спектра появилась только 25 лет спустя благодаря открытию Вогеля, применившего т.н. *сенсибилизирующие красители*. Секрет Максвелла был раскрыт Эвансом (Evans, 1961), показавшим, что максвел-

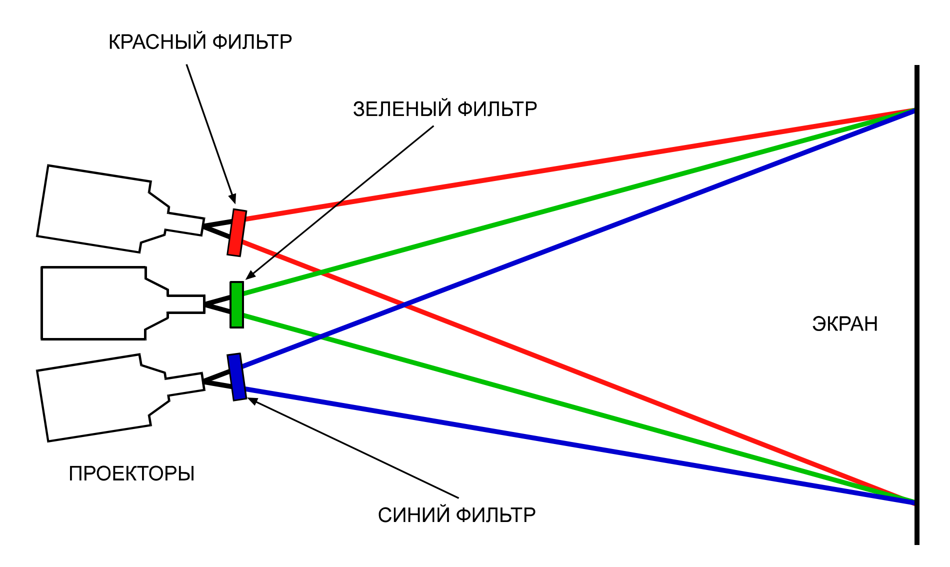


Рис. 2.1 Аддитивное цветовоспроизведение с помощью тройного проектирования.

ловский зеленый фильтр на самом деле пропускал *сине*-зеленый свет, которого оказалось достаточно для экспонирования пластин, а регистрация изображения за красным фильтром на самом деле произошла благодаря пропущенному этим фильтром ультрафиолетовому излучению. Наконец, Эванс продемонстрировал то, что многие красные краски, которые, вероятно, использовались для отделки шотландской ткани, бывшей предметом максвелловского изображения, отражали не только красный свет, но также и ультрафиолет. Таким образом, хотя максвелловские трихроматические изображения и оказались полученными за счет синего, сине-зеленого и ультрафиолетового излучений, они смогли воспроизвести цветовую репродукцию вполне приемлемого качества. То есть, как это иногда случается с великими людьми, Максвелл оказался прав в принципе, ошибаясь при этом в частном!

В 7-й главе принципы трихроматического цветовоспроизведения будут выведены из экспериментов по цветовому сравнению. Такой подход академически строг, но достаточно сложен, поэтому в данной главе мы будем рассуждать несколько иначе: за основу рассуждений мы примем физиологию цветового зрения человека, на базе которой (в общих чертах и весьма коротко) рассмотрим, в чем состоят преимущества и недостатки трихроматического цветовоспроизведения.

Трихроматический подход к цветовоспроизведению не зависит, однако, от каких-либо специальных физиологических теорий, но скорее от того факта, что весьма широкий диапазон промежуточных цветовых стимулов можно получить смешиванием красного, зеленого и синего световых потоков. Такая смесь может быть получена или непосредственно, или же путем использования трех красителей или пигментов: желтого, поглощающего синий свет, пурпурного, поглощающего зеленый, и сине-зеленого (циан), поглощающего красный.

2.3 ФИЗИОЛОГИЯ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Общеизвестно, что сетчатка человеческого глаза содержит в себе светочувствительные клетки двух типов: т.н. *палочки* и *колбочки*. К 1900 г. было четко установлено, что бесцветным зрение становится при очень низких уровнях освещенности (таких как

слабый лунный свет или свет звезд) и зависит от отбеливания (bleaching) некоей светочувствительной субстанции, содержащейся в палочках и именуемой *зрительным пурпуром*. В данной логике вполне естественно приписать трехкомпонентность и *цветовому* зрению, объяснив природу последнего отбеливанием трех разных светочувствительных субстанций, содержащихся в колбочках. Однако такое объяснение неочевидно: отчасти из-за того что, во-первых, колбочек гораздо меньше, чем палочек, и, во-вторых, из-за того что их чувствительность меньше, поскольку они содержат существенно менее реактивный фотопигмент.

Вместе с тем у разных животных были обнаружены фоточувствительные пигменты, поглощающие свет в разных зонах видимого спектра, как то и требуется системе цветового зрения, основанной на таких пигментах (Dartnall и Lythgoe, 1965). Измерения показали, что при облучении человеческой сетчатки сильным светом, доля света, отраженная от сетчатки, возвращается через зрачок с такой цветностью, как если бы три пигмента были отбелены (Rushton, 1957 и 1958; Weale, 1959; Ripps и Weale, 1963; Brown и Wald, 1964; Mitchell и Rushton, 1971). То есть, подтвердилось то, что первый пигмент поглощает красный свет, второй пигмент — зеленый, и третий — синий. Много позже человеческий колбочковый пигмент был получен искусственно в специальной биотканевой культуре (Oprian, Asenjo, Lee и Pelletier, 1991).

Экстренное посмертное микроскопическое исследование отдельных колбочек показало, что в разных колбочках содержатся разные пигменты (Marks, Dobelle и MacNichol, 1964; Brown и Wald, 1964; Bowmaker и Dartnall, 1980). После того как свет поглотится пигментами, генерятся электрические сигналы (в форме нервных импульсов), несущие в мозг цветовую (и прочую) информацию об изображении внешнего мира на сетчатке. В тех слоях сетчатки, где сигналы, идущие по нервным волокнам от колбочек и палочек, объединяются между собой, возникает великое множество сложных, запутанных связей, и после этого цветовая информация кодируется принципиально иными сигналами, уже не представляющими результат абсорбции света тремя пигментами. Так, например, у некоторых животных (в том числе и у человека) передаваемые сигналы подобны яркостному и цветоразностным сигналам, используемым в цветном телевидении (Svaetichin и MacNichol, 1958; De Valois, 1970; MacNichol, 1964; Hurvich и Jameson, 1957; Hunt, 1982).

После поглощения света пигментами сетчатки, в ней начинается поэтапная обработка сигналов, причем характер обработки остается неизменным, если неизменен характер поглощения (при условии неизменности условий просмотра). Следовательно, ключ к успеху трихроматического цветовоспроизведения нужно в первую очередь искать на стадии поглощения света фотопигментами сетчатки.

2.4 КРИВЫЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕТЧАТКИ

Чтобы детально разобраться в процессах, происходящих на стадии сетчаточной абсорбции, нам следует познакомиться с тем, по какому принципу меняется на протяжении всего спектра способность каждого из трех пигментов поглощать свет (и обесцвечиваться), производя тем самым т.н. визуальный отклик (visual response). То есть мы должны знать кривую спектральной чувствительности каждого из трех пигментных механизмов.

Всегда считалось, что чувствительности, измеренные косвенными методами, неплохо аппроксимируются кривыми, показанными на рис. 2.2 (a) (Wright, 1946; Thomson и Wright, 1953; Stiles, 1978), и следует отметить, что прямые измерения, вы-

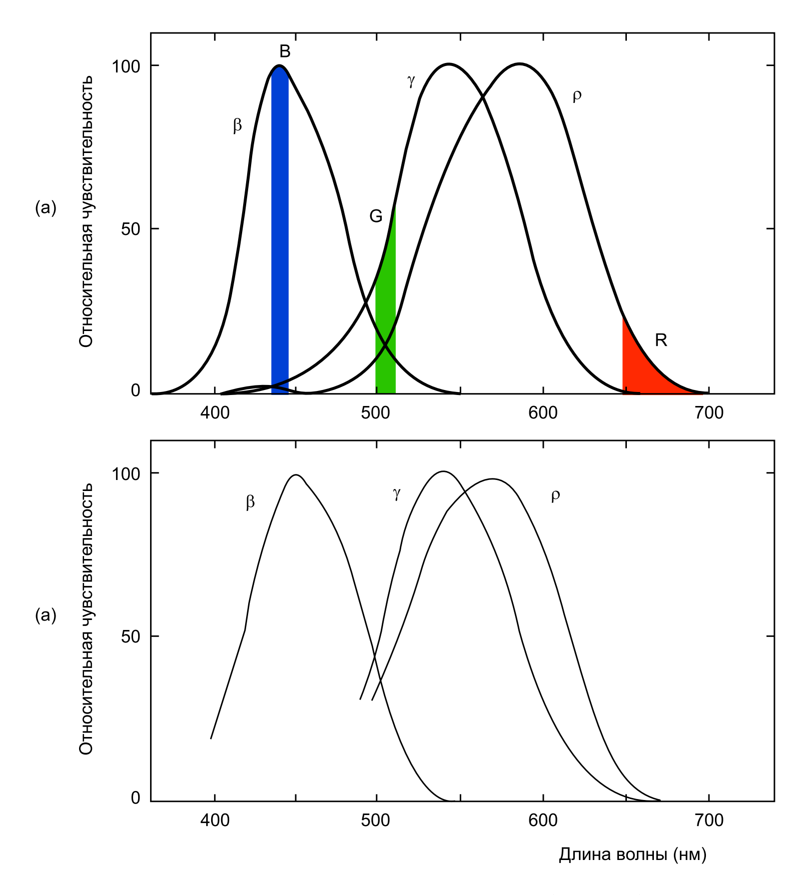


Рис. 2.2 (a) — предполагаемые кривые чувствительностей (β, γ и ρ) трех типов фоторецепторов, отвечающих за цветовое зрение (кривые получены косвенными методами), совокупно с тремя спектрально-чистыми RGB-световыми потоками, наиболее подходящими аддитивному цветовоспроизведению; (b) — кривые спектральной чувствительности, обычно получаемые в результате экспериментов по обесцвечиванию пигментов в сетчатке чeовеческого глаза.

полненные путем оценки света, отраженного от сетчатки и прошедшего назад через зрачок, дают сходные результаты (рис. 2.2 [b]). Однако прямые измерения весьма затруднительны в «синей» части спектра, поскольку продукты обесцвечивания пигментов, поглощая свет в разных количествах, не дают при этом соответствующих цветовых откликов. По упомянутой причине измерения по «сине»-поглощающему пигменту менее точны, чем по «красно»- или «зелено»-поглощающему, а в ряде исследований по «синему» пигменту вообще нет результатов.

Параметры кривых, наилучшим образом отражающих т.н. *спектральную световую эффективность* (action spectra), то есть визуальный отклик по различным длинам волн света, падающего на роговицу человеческого глаза, по-прежнему остаются предметом активного обсуждения. Некоторые кривые достигают максимума на длинах волн порядка 440, 535 и 565 нм (Smith и Pokorny, 1975); кривые, показанные на рис. 2.2 (a), имеют пики на 440, 545 и 580 нм, что получено при иных исследованиях, выполненных, в частности, Estevez (Estevez, 1979). Прочие варианты кривых, однако, аналогичны обсуждаемым в данной главе и в целом столь же верны.

Далее. Очевидно, что колбочковые чувствительности накладываются друг на друга: чувствительность первого типа покрывает красную, оранжевую и желтую части спектра, чувствительность второго типа — оранжевую, желтую, зеленую и сине-

зеленую, третьего — сине-зеленую, синюю и фиолетовую. Мы будем расценивать эти чувствительности как принадлежащие колбочкам трех разных типов: ρ, γ и β соответственно (если бы в некоторых колбочках присутствовало несколько пигментов, то кривые их спектральной чувствительности были бы суммой показанных кривых и нижеследующие рассуждения не имели бы смысла [Hunt, 1952 и 1959]; однако исследования сетчатки свидетельствуют, что каждая колбочка содержит в себе только один из трех возможных пигментов [Marks, Dobelle и MacNichol, 1964]).

Теперь, возвращаясь к максвелловскому методу, мы начинаем понимать, что цветовая репродукция будет верной в том случае, когда фотопленка с помощью трех негативных сепараций «проанализировала» сцену аналогично зрительной системе человека. Следовательно, спектральные чувствительности трех пленочных фильтров должны походить на те, что показаны на рис. 2.2. Сие не является непреодолимой трудностью и весьма эффективно достигается использованием панхроматических пленок и соответствующих фильтров. Следует отметить, что, вследствие широкого спектрального охвата ρ- и γ-кривых, красный фильтр фактически выглядит оранжевым, а зеленый фильтр — менее насыщенным, чем монохроматический зеленый.

Когда спектральные коэффициенты пропускания чувствительности пленочных фильтров оказываются пропорциональны чувствительностям, кривые которых показаны на рис. 2.2, величины фотоизображения по каждой точке наших негативов представляют собой функции от откликов ρ-, γ- и β-колбочек по соответствующим элементам сцены. Следовательно, в позитивах пропускание по каждой точке будет пропорционально ρ-, γ- и β-откликам (при условии, что позитивный фотопроцесс корректно соотносится с экспонированными негативами).

Если спектральный коэффициент пропускания фильтров, установленных перед проекторами, окажется таким, что красный свет будет возбуждать только ρ-колбочки, зеленый — только γ-колбочки, а синий — только β-колбочки, на выходе мы получим корректную цветовую репродукцию, поскольку каждая точка на экране вызовет те же самые ρ-, γ- и β-отклики сетчатки, что и соответствующие точки в оригинальной сцене (при условии, что уровень освещенности и условия просмотра те же). К сожалению, «если», стоя́щее в начале абзаца, делает желаемое невозможным.

2.5 ПАРАЗИТНОЕ КОЛБОЧКОВОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Из рис. 2.2 (а) ясно, что свет, пропущенный красным фильтром, т. е. свет с длинами волн только порядка 650 нм, будет возбуждать лишь ρ-колбочки, а свет с длиной волны порядка 450 нм, пропущенный синим фильтром, будет стимулировать в основном β-колбочки (и лишь слегка γ- и ρ-). При этом в спектре нет такой зоны, к свету которой были бы чувствительны только γ-колбочки, и, следовательно, невозможно найти фильтр, который бы пропускал свет, возбуждающий только их. Лучшее, что можно сделать, это выбрать фильтр, пропускающий узкополосный свет в районе 510 нм (отметка G на рис. 2.2 [а]; полосы светопропускания красного и синего фильтров отмечены соответственно как R и B).

Эффект от действия такого зеленого фильтра заключается в том, что по всем участкам экрана, где отражается свет зеленого проектора, возникают паразитные избыточные ρ- и β-отклики, и избыток этот, конечно же, наиболее значим в случае зеленых тонов (которые будут терять насыщенность) и менее значим в случае красных и синих тонов, при которых γ-отклик мал. Белые тона будут иметь умеренный (средний) избыток ρ- и β-откликов, приобретая при этом легкий пурпурный оттенок (что преодолимо за

счет раздельной регулировки относительных интенсивностей лучей проекторов: бело-пурпурный в итоге станет белым, что частично откорректирует и все низконасыщенные тона; вместе с тем насыщенные окажутся слегка искаженными по цветовому тону и относительным интенсивностям, что, как правило, существенно менее значимо, чем искажения в воспроизведении цветовых стимулов, близких к белому или к серому).

Если полосы пропускания фильтров эквивалентны тем, что показаны на рис. 2.2 (а) (т. е. R, G и B), то это значит, что каждый фильтр пропускает свет лишь очень узкой полосы спектра, а бóльшую часть света, испускаемого лампами проекторов, поглощает. Чтобы подавать на экран большее количество света от каждого проектора и, следовательно, чтобы воспроизводить визуально более яркую картину, на практике всегда ис-

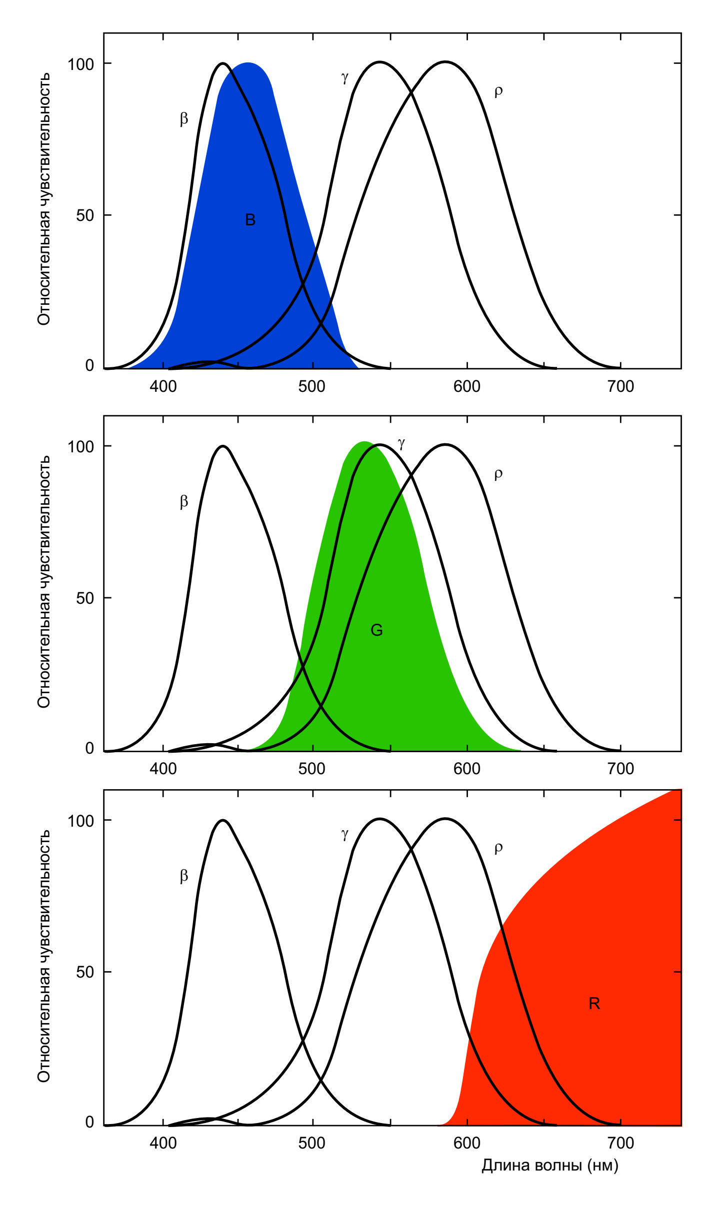


Рис. 2.3 ρ, γ, и β-кривые спектральной чувствительности сетчатки и спектральное распределение энергии света, пропущенного красным, зеленым и синим фильтрами, обычно используемыми в аддитивном цветовоспроизведении (сплошные заливки, обозначенные как R, G, B).

пользуются фильтры, имеющие более широкую полосу пропускания (наподобие тех, что показаны на рис. 2.3). Последнее неизбежно ведет к дальнейшему ухудшению цветопередачи, поскольку свет от каждого проектора дает еще большее паразитное возбуждение колбочек, чем при использовании фильтров, показанных на рис. 2.2 (а).

При получении красного, зеленого и синего света не вышеописанным способом, а за счет возбуждения люминофоров (как это делается в цветном телевидении), возникает ситуация (рис. 2.4), сходная с той, что показана на рис. 2.3.

Таким образом, становится ясно, что неспособность любых красных, зеленых и синих световых потоков к раздельному возбуждению колбочек сетчатки в целом затрудняет процесс трихроматического цветовоспроизведения. Если бы кривые спектраль-

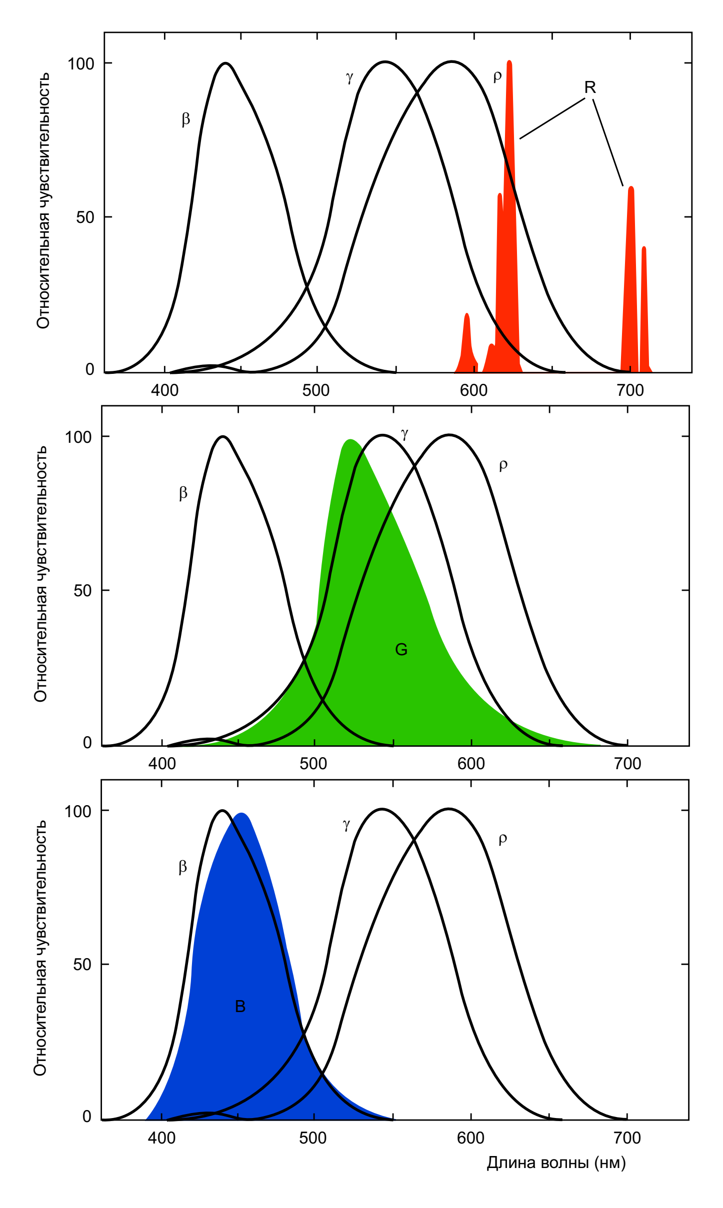


Рис. 2.4 ρ, γ, и β-кривые спектральной чувствительности сетчатки и кривые спектрального распределения энергии света красного, зеленого и синего фосфоров обычно используемых в цветном телевидении (сплошные заливки, обозначенные как R, G, B).

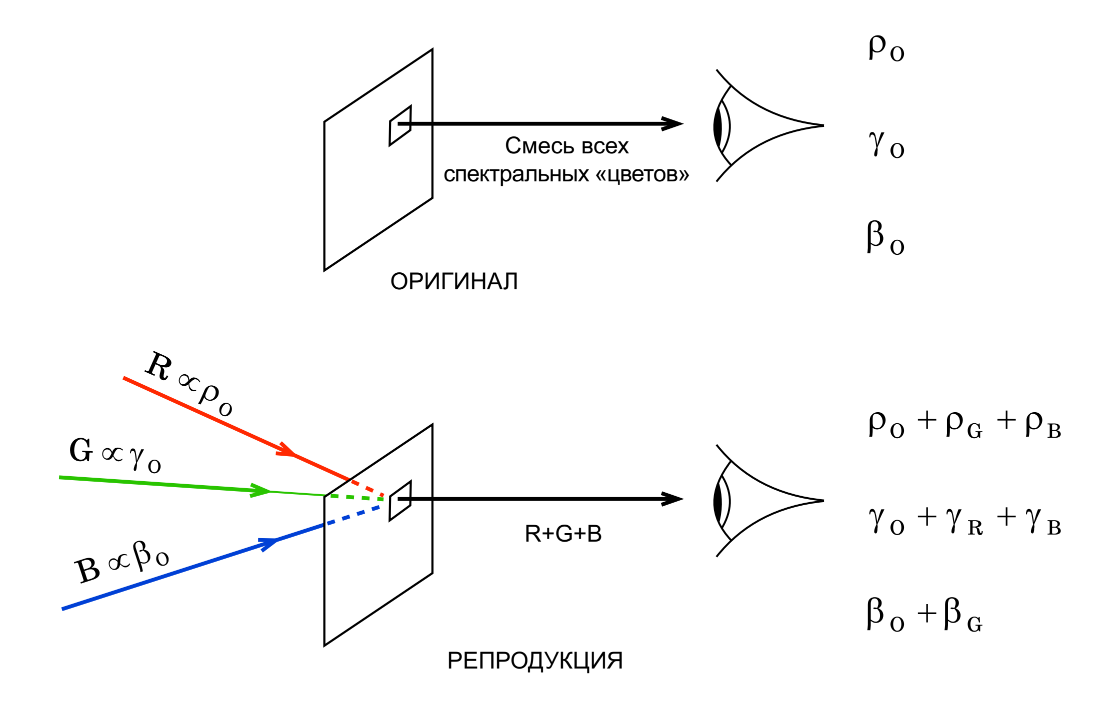


Рис. 2.5 Схематичная иллюстрация неточности трихроматического цветовоспроизведения.

ной чувствительности ρ- и β-колбочек не перекрывались в «сине-зеленой» части спектра, то средневолновый свет возбуждал бы только γ-колбочки; однако коль скоро ρ- и β-кривые явно накладываются друг на друга, то свет средних длин волн не может стимулировать одни лишь γ-колбочки (γ-фоторецепторы). Цветовому зрению такая накладка крайне необходима: она создает основу эффективной детекции изменений в цветовом тоне стимулов всего спектрального диапазона, но в контексте цветовоспроизведения это означает, что некоторые цветовые стимулы с помощью трихроматических методов корректно воспроизвести невозможно (и, как мы видим, причина сего заключена в физиологии цветового зрения человека). Таким образом, при работе цветорепродукционных систем мы неизбежно сталкиваемся с проблемой *паразитного возбуждения* (unwanted stimulations) колбочковых фоторецепторов.

Сказанное выше продемонстрирует рис. 2.5: если некая часть оригинала вызывает отклики ρ_O, γ_O и β_O и если интенсивности *R*, *G* и *B* красного, зеленого и синего воспроизводящих потоков пропорциональны этим откликам, то результат воспроизведения будет несостоятелен, бо красный луч вызовет паразитный γ-отклик (γ_R), зеленый луч — паразитные ρ- и β-отклики (ρ_G и β_G), а синий — паразитные отклики ρ и γ (ρ_B и γ_B).

Таким образом, проблема состоит в том, что вместо определенных величин красного (ρ), зеленого (γ) и синего (β) откликов, эквивалентных оригинальным ρ_O, γ_O и β_O, мы, при наличии паразитного возбуждения, получим:

$$\rho = \rho_O + \rho_G + \rho_B$$

$$\gamma = \gamma_O + \gamma_R + \gamma_B$$

$$\beta = \beta_O + \beta_G$$

Далее. Воспроизведению белого стимула и промежуточных серых (белый и серый можно толковать как ощущения, возникающие при равновеликих ρ, γ и β-откликах) требует того, чтобы интенсивности красного, зеленого и синего световых потоков соответственно уменьшаются. По иным стимулам эффект от появления паразитных возбуждений состоит в том, что ρ, γ и β-отклики становятся ближе друг другу по величине, и, следовательно, восприятие стремится к белому или серому, то есть полнота цвета (colorfulness) падает. То есть наложение кривых колбочковых чувствительностей друг на друга (рис. 2.2) делает невозможной выборочную стимуляцию колбочек разных типов, что в свою очередь ведет к невозможности корректного воспроизведения некоторых цветов простыми трихроматическими средствами.

В следующих главах мы будем говорить о важности описанного недостатка и о путях его компенсации, и, кстати, о том, что подгонка спектральных чувствительностей фильтров фотопленки под кривые ρ, γ и β является отнюдь не лучшим решением проблем, возникающих при трихроматическом цветовоспроизведении. Вместе с тем, описанные недостатки трихроматического метода далеко не всегда заметны на практике, и очень часто изображения, воспроизведенные этим способом, обладают отменным качеством.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Birren, F., Color Res. Appl., 6, 85 (1981).

Bowmaker, J.K., and Darnall, H.J.A., J. Physiol., 298, 131 and 501 (1980).

Brown, P.K., and Wald, G., Science, 144, 45 (1964).

Dartnall, H.J.A., and Lythgoe, J.N., Vision Research, 5, 81 (1965).

DeValois, R.L., Proc. 1st A.I.C. Congress, Stockholm, p. 29 (1970).

Estevez, O., Ph.D. Thesis, University of Amsterdam (1979).

Evans, R.M., J. Phot. Sci., 9, 243 (1961).

Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 42, 198 (1952).

Hunt, R.W.G., Nature, 183, 1601 (1959).

Hunt, R.W.G., Color. Res. Appl., 7, 95 (1982).

Hurvich, L.M., and Jameson, D., Psychol. Rev., 64, 384 (1957).

MacNichol, E.F., Vision Research, 4, 119 (1964).

Marks, W.B., Dobelle, W.H., and MacNichol, E.F., Science, 143, 1181 (1964).

Maxwell, J.C., Proc. Roy. Inst., 3, 370 (1858–62).

Mitchell, D.E., and Rushton, W.A.H., Vision Research, 11, 1045 (1971).

Oprian, D.D., Asenjo, A.B., Lee, N., and Pelletier, S.L., Biochemistry, 30, 11 367 (1991).

Ripps, H., and Weale, R.A., Vision Research, 3, 531 (1963).

Rushton, W.A.H., Visual Problems of Colour, p. 73, N.P.L. Symposium, H.M.S.O., London (1957).

Rushton, W.A.H., Nature, 182, 690 (1958).

Smith, V.C., and Pokorny, J., Vision Research, 15, 161 (1975).

Stiles, W.S., Mechanisms of Colour Vision, Academic Press, London (1978).

Svaetichin, G., and MacNichol, E.F., Ann. N.Y. Acad. Sci., 74, 385 (1958).

Thomson, L.C., and Wright, W.D., J. Opt. Soc. Amer., 43, 890 (1953).

Wall, E.J., The History of Three-Color Photography, p. 1, American Photographic Publishing Co., Boston (1925).

Weale, R.A., Nature, 179, 648 (1957).

Weale, R.A., Optica Acta, 6, 158 (1959).

Wright, W.D., Researches on Normal and Defective Colour Vision, Chapters 21 and 30, Kimpton, London (1946).

ЛИТЕРАТУРА

Boynton, R.M., Human Color Vision, Holt and Rinehart-Winston, New York (1979).

Coe, B.W., Colour Photography, the First Hundred Years, Ash and Grant, London (1978).

Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, Wiley, New York (1953).

Wall, E.J., The History of Three-Color Photography, American Photographic Publishing Co., Boston (1925).

3 АДДИТИВНЫЕ МЕТОДЫ

3.1 ВВЕДЕНИЕ

Как будет показано ниже, максвелловский трихроматический метод цветовоспроизведения, реализуемый, в частности, тройным проектированием, гораздо практичнее микродисперсионного или липпмановского спектральных методов. Тройное проектирование ныне широко используется в телевидении, особенно в тех случаях, когда изображение должно демонстрироваться большой аудитории. К примеру, три телевизионных трубки проецируют красное, зеленое и синее изображения на специально изогнутый или полупрозрачный экран. Изначально изображения воспроизводятся на миниэкранах, покрытых люминофором и выдающих под воздействием электронного пучка либо красный, либо зеленый, либо синий свет; объектив, обладающий очень высокой оптической силой, передает увеличенное изображение с каждого миниэкрана на экран просмотровый. Примером устройства описанного типа являлась система Advent Videobeam (Federman и Pomicter, 1977).

Отметим, что широкому применению максвелловского метода долгое время препятствовали трудности с обеспечением точности пространственной приводки воспроизводящих трихроматических изображений (сепараций), а также высокая стоимость триплетных проекционных аппаратов. Однако красный, зеленый и синий лучи можно смешать пятью другими способами[1]:

— методом последовательных кадров;
— мозаичным методом;
— лентикулярным (линзово-растровым) методом;
— методом мнимых изображений;
— дифракционным методом.

Пять перечисленных способов в совокупности с тройным проектированием обычно называют *аддитивными*, поскольку все цветовые стимулы получаются смешением в разных пропорциях первичных красного, зеленого и синего световых потоков.

3.2 МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ КАДРОВ

Данный метод, применявшийся ранее в кинематографии и на телевидении, эффективен в том случае, когда красные, зеленые и синие лучи последовательно и с высокой частотой попадают на сетчатку: первичные (кардинальные) цветовые стимулы (красный, зеленый и синий) становятся неразличимыми, а результирующее воздействие на сетчатку глаза наблюдателя оказывается идентичным воздействию при тройном проектировании.

В кинематографе одно время использовалась камера перед объективом которой, синхронно с затвором, вращался диск, содержащий последовательные сегменты красного, зеленого и синего фильтров, то есть сцена регистрировалась вначале через первый фильтр, затем через второй и, наконец, через третий. Отснятая пленка, как прави-

[1] Не считая т.н. *субтрактивных* процессов, в которых используются красители, пигменты или чернила.

ло, обрабатывалась по черно-белому позитивному процессу и проектировалась на экран с аналогичным диском, вращавшимся перед объективом проектора и синхронно с его обтюратором. Таким образом, всякий раз, когда «красный» позитив (то есть сделанный с негатива, полученного через красный фильтр) попадал в кадровое окно, красный фильтр оказывался перед объективом проектора. То же в отношении зеленого и синего.

В цветном телевидении диск, сегментированный тремя фильтрами, вращался перед объективом телекамеры и такой же диск синхронно вращался перед телеприемником.

К сожалению, в описанных системах синий фильтр всегда намного темнее красного и зеленого, что ведет к заметному дрожанию изображения даже тогда, когда скорость вращения, казалось бы, достаточна и паразитного мерцания быть не должно. Требуемая скорость зависит от интенсивности света и при обычной статичной сцене составляет 50 об/с, в сумме давая за секунду 150 красных, зеленых и синих «полей». Но даже при такой скорости вращения у движущихся объектов может появиться паразитный хроматический контур (цветная кайма), в особенности если объект окрашен так, что при регистрации попадает преимущественно в одно из трех изображений.

В 1950 г. Американская Федеральная Комиссия по коммуникациям (F.C.C) стандартизировала цветную телевизионную систему «Columbia», основанную на последовательных кадрах со скоростью вращения диска 144 оборота в секунду. Но из-за требований техники безопасности, а также, вероятно, из-за своей *несинхронизируемости* с системами черно-белыми, «Columbia» не получила широкого распространения; более того, вращающийся диск оказался слишком инертен, позиционно неточен и склонен к частым механическим поломкам. Впоследствии решение F.C.C. от 1950 г. было отменено, а в 1953 г. принята уже нормально синхронизируемая система (Law, 1977).

В кинематографе метод последовательных кадров никогда не имел коммерческого успеха, поскольку уход от мерцания и паразитной хроматической каймы на движущихся объектах требовал высокочастотной проекции и очень большого расхода пленки.

3.3 МОЗАИЧНЫЙ МЕТОД

Самый простой и самый эффективный метод аддитивного трихроматического цветовоспроизведения — мозаичный. Если красные, зеленые и синие микроячейки рассматривать с определенного расстояния, то сами по себе они не будут видны — зрением они воспримутся как единый цветовой стимул, характер которого зависит от относительных величин света, испускаемого ячейками каждого типа. Следовательно, если большее количество света испускается красными и зелеными ячейками, нежели синими, то результирующее цветовое ощущение будет таким же, как при проекционном смешении красного и зеленого, то есть — желтым. Таким образом, получить цветную фотографию способом, аналогичным максвелловскому, можно, выполнив черно-белое фотографирование через мозаику красной, зеленой и синей ячеек, обратив негативы в позитивы (или напечатав их с негативов) и просматривая их в соответствии с ячейками при фотографировании. Физиологическая эффективность метода обеспечивается тем, что сами колбочки образуют мозаику, и если изображение фотографической мозаики сопоставимо с мозаикой сетчатки, то три цветовых стимула будут смешиваться с тем же успехом, что и при тройном проектировании.

3.3.1 Краткая историческая справка

У фотографических мозаичных процессов долгая и примечательная история.

Пластины «Autochrome», состоящие из стохастической (беспорядочной) мозаики красных, зеленых и синих крахмальных зерен с промежутками, заполненными угольным порошком, поступили в продажу в 1907 г. и активно раскупались до начала 30-х годов. Аналогичная мозаичная система «Agfacolor» была построена на беспорядочной мозаике смоляных пятен.

Весьма продуктивными оказались методы, в которых использовались *регулярные* мозаики красного, зеленого и синего: метод Финлея и Темса (1906), позднее известный в Британии как растровые пластины Джонсона, а также метод «Dufaycolor» (1908), в котором примерно к 1935 г. гранулярность ячеек достигла фантастической цифры — миллион ячеек на квадратный дюйм (что привело к огромному коммерческому успеху системы). Регулярные мозаики оказались лучше стохастических, поскольку в последних часто возникает случайное скопление одноцветных элементов, образующее порой явно заметные пятна.

В 1977 г. Polaroid представил систему «моментального» кино «Polavision» (Land, 1977), где вместо традиционной мозаики были использованы сверхузкие полоски: 1500 красно-зелено-синих триад на дюйм (60 на мм). В 1983 г. появилась аналогичная система «моментальных» 35-мм слайдов «Polachrome» с 1000 триад на дюйм (40 на мм), что даже меньше, чем в кинопленках формата Super 8, однако резкость изображений оказалась довольно высокой. Система воспроизводила позитивные изображения за счет перемещения неэкспонированных зерен галоидного серебра в некий принимающий слой, а негативный слой удалялся после обработки (что занимало одну минуту). Из-за присутствия фильтровых полосок максимальный перенос был достаточно низок (примерно 20%), поэтому адекватная насыщенность элементов слайд-изображений достигалась за счет высокой контрастности.

3.3.2 Теневая маска

Сегодня мозаичные процессы интересны в контексте цветного телевидения и WEB, где до самого недавнего времени широко использовались электронно-лучевые трубки, покрытые изнутри регулярной мозаикой люминофоров трех типов, то есть под действием электронов испускающих красный, зеленый и синий свет. Если электронный пучок в трубке сканирует мозаику по одной линии за один раз, то можно предположить, что колесо с фильтрами перед объективом телекамеры должно было вращаться с такой скоростью, чтобы в момент, когда электронный пучок возбуждал одну красную люминофорную точку, красный фильтр становился бы перед объективом камеры (по зеленому и синему — аналогично). Однако простой расчет свидетельствует, что сие недостижимо: если, к примеру, мы имеем телевизионную систему с 500 линиями, то есть с 500 точками каждого люминофора на одну полосу, фильтровый диск должен крутиться со скоростью 500×500 оборотов на каждый кадр, а 25 кадров в секунду потребовали бы скорости вращения 6250000 оборотов в секунду, что совершенно невозможно — ни одно колесо не в состоянии вращаться с такой скоростью.

Чтобы справиться с описанными трудностями, нужно было каким-то образом добиться того, чтобы, скажем, когда красный фильтр вставал перед объективом, электронный пучок, сканирующий мозаику люминофоров, попадал бы только на красносветящийся люминофор, не затрагивая при этом зелено- и синесветящихся; как только зеленый фильтр оказывался перед объективом камеры — игнорировались бы

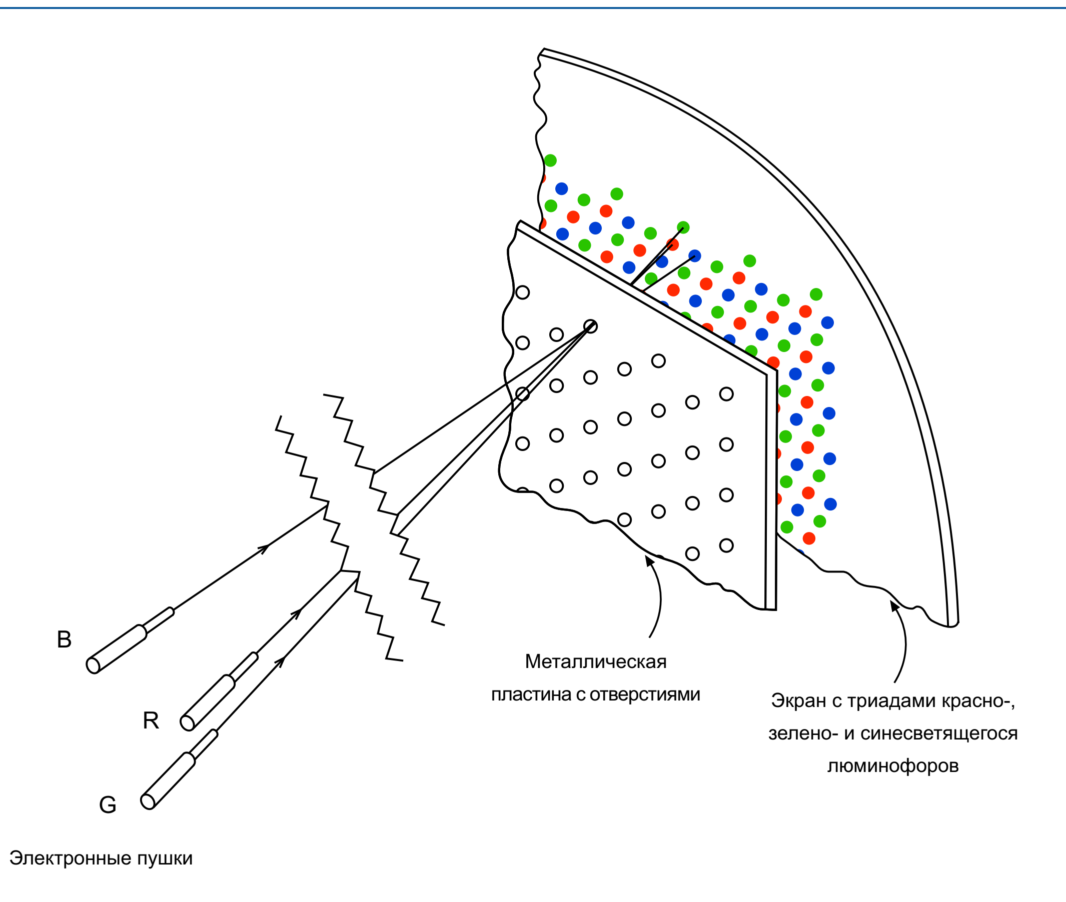


Рис. 3.1 Схема цветной телевизионной трубки с теневой маской.

красно- и синесветящиеся люминофоры, а электронный пучок падал только на зеленосветящийся люминофор. То же по синему фильтру и люминофору.

Один из путей решения поставленной задачи показан на рис. 3.1: красно-, зелено- и синесветящиеся люминофоры так расположены на экране трубки, как если бы они были нанесены (каждый в свою позицию) через находящуюся непосредственно позади экрана металлическую пластину с большим количеством мелких отверстий. Каждое отверстие в пластине соответствует микроканалам камеры, и каждому отверстию на экране трубки соответствует одна люминофорная триада. Пластина с отверстиями именуется *теневой маской*, а кинескопы такого типа — *трубками с теневой маской*.

В цветной телевизионной трубке использовались три электронных пушки, направленных в три позиции: R, G и B. Систему можно было настроить так, что в момент, когда красный фильтр становился против объектива телекамеры, в телеприемнике срабатывала только R-пушка, и, следовательно, облучался только красносветящийся люминофор. Как только зеленый фильтр сменял красный, так R-пушка останавливалась и начинала работу G-пушка, облучая только зеленосветящиеся люминофоры. То же в отношении синего. При таком устройстве системы фильтровый диск вращался со скоростью, необходимой лишь для ухода от паразитных эффектов мерцания и появления хроматической каймы у движущихся объектов. (Альтернативно: использовалась только одна электронная пушка, лучи которой, сразу после прохода через отверстия, отклонялись электростатической или электромагнитной системами в направлении нужного люминофора синхронно с фильтровым диском камеры).

Несмотря на то что в связке с мозаичными трубками можно использовать камеры,

основанные на принципе последовательных кадров, на практике из соображений совместимости (а также ряда других) действующие системы цветного телевидения по сей день используют камеры, в которых при помощи полупрозрачных зеркал формируются три сепарированных, но геометрически идентичных изображения, попадающие затем на общий объектив. Объектив, в свою очередь, передает изображения через красный, зеленый и синий фильтры на светочувствительные поверхности трех телевизионных трубок или твердых датчиков (альтернативно: единичное изображение используется со сверхмелкой мозаикой красных, зеленых и синих сенсоров). Таким образом, красное, зеленое и синее изображения оказываются доступными одновременно; при этом радиосигналы в реальном времени управляют мощностью непрерывно работающих электронных пушек телеприемника, бомбардирующих люминофоры, которые в свою очередь продуцируют RGB-потоки необходимой интенсивности. (Описание методов передачи и получения *одновременных* цветных изображений можно найти в главах 19 и 20).

Стоит отметить также, что при работе описанных телевизионных систем не возникает необходимости в совпадении линий точечных триад с линиями регистрации изображений — необходимо только, чтобы количество точек было достаточным для создания изображения без выраженных потерь его деталировки. Точное позиционирование трех пушек, апертур металлической пластины и точек люминофоров критичны в колориметрическом аспекте, но точность расположения линий изображения в трубке не имеет значения.

Как и в цветной фотографии, в цветном телевидении и WEB мозаичные аддитивные технологии дают наилучшие результаты.

3.4 ЛИНЗОВО-РАСТРОВЫЙ (ЛЕНТИКУЛЯРНЫЙ) МЕТОД

Одной из весьма изящных вариаций мозаичного метода являлся метод линзово-растровый (лентикулярный), который подобно системе *Kodacolor*[1], имевшей успех в любительской кинематографии, был вполне применим к цветному телевидению.

Фотографический вариант реализации лентикулярного метода показан на рис. 3.2: на поверхность фотопленки наносились плотно прилегающие друг к другу тонкие жгуты полукруглого сечения (лентикулы), а эмульсионное покрытие делалось на противоположной стороне подложки. Пленка в фотоаппарате располагалась так, что ее жгуты оказывались направленными в сторону объектива, а радиус их кривизны подбирался таким образом, что изображение, переданное объективом, фокусировалось на эмульсионном слое пленки. Перед объективом аппарата параллельно лентикулам фотопленки располагались стрипы красного, зеленого и синего фильтров, в результате чего изображения от последних ложились каждый на свою лентикулу и по всей их длине. Следовательно, изображение оригинальной сцены разбивалось на стриповые триады, причем таким образом, что каждый отдельный стрип экспонировал только свою лентикулу: на верхнюю лентикулу попадал свет, прошедший только через красный фильтр, на среднюю — свет, прошедший через зеленый, а на нижнюю — через синий фильтр.

Отснятая пленка обрабатывалась по обращающему процессу (или по негативному с последующей печатью позитива) и проектировалась соответственно через аналогич-

---

1 Старую аддитивную систему *Kodacolor*, действовавшую в 1928—35 гг., не следует путать с сегодняшней субтрактивной системой *Kodacolor*.

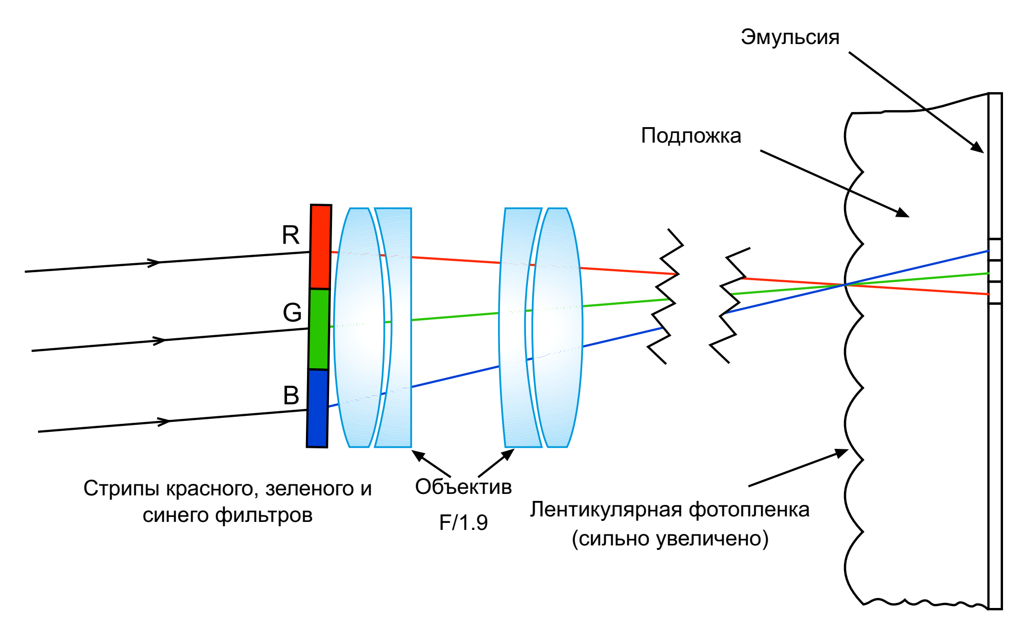


Рис. 3.2 Общая схема реализации лентикулярного метода в аддитивной цветной фотографии.

ные красный, зеленый и синий фильтры, расположенные в виде стрипов перед объективом проекционного аппарата. Белый проекционный свет, прошедший через нижнюю лентикулу, проходил через стрипы только красного фильтра, прошедший через среднюю лентикулу — через стрипы зеленого фильтра, прошедший через верхнюю — синего. Проекционный объектив, фокусируя на экране красные, зеленые и синие лучи по соответствующим точкам, аддитивно смешивал их, причем с той же результативностью, что и в случае тройного проектирования.

Старый *Kodacolor*-процесс в течение многих лет успешно использовал 22 лентикулы на миллиметр и только в 1951 г. головным отделением Eastman Kodak Company (США) была предложена его усовершенствованная версия для 35-мм профессиональной кинематографии (British Journal of Photography, 1951). В дальнейшем лентикулярные пленки были опробованы в качестве носителя для записи программ цветного телевидения, где критичны скорость и простота обработки кинофотоматериалов (Evans и Smith, 1956; Brown, Combs и Smith, 1956; Crzne и Evans, 1958; Duke, 1963).

Стоит отметить также, что в лентикулярных системах синтез нужных цветовых стимулов требовал только того, чтобы изображение было точно расположено относительно лентикул, а расположение всей пленки относительно фильтровых стрипов проекционного объектива не имело принципиального значения.

Для цветного телевидения и WEB по подобному принципу (но с использованием электронных «линз») изготавливались различные экспериментальные трубки (Dressel, 1953), но ощутимого коммерческого успеха достигли лишь трубки марки *Trinitron*, в которых красный, зеленый и синий люминофоры располагались вертикальными полосами, а также задействовался модифицированный вариант теневой маски со щелями вместо круглых отверстий (т.н. *щелевая маска*). Геометрия тринитроновой трубы была организована так, что электроны от одного пучка воздействовали на люминофоры только «красных» полос, от другого — только «зеленых», от третьего — только «синих». Регулируя мощность трех электронных пучков, радиосигнал в конечном счете управлял требуемыми мощностями красного, зеленого и синего световых потоков.

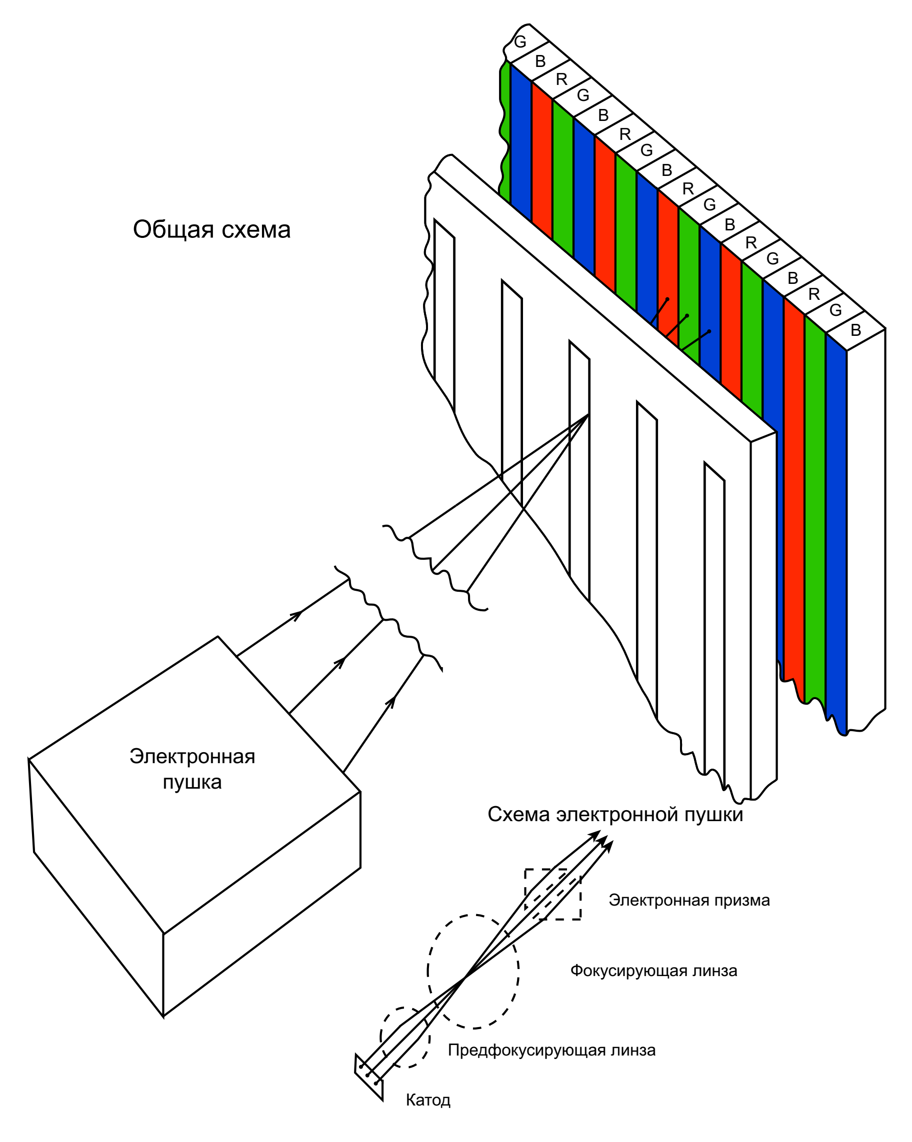


Рис. 3.3 Схема цветной телевизионной трубки марки Trinitron.

Когда изображение, воспроизведенное тринитроновой трубкой, рассматривается с обычного просмотрового расстояния, полосы люминофоров оказываются визуально неразличимыми, и красный, зеленый и синий лучи благополучно смешиваются на сетчатке глаза.

3.5 МЕТОД МНИМЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

При данном методе аддитивного синтеза мнимые изображения, полученные с обычных черно-белых позитивов посредством полупрозрачных зеркал, просматриваются через красный, зеленый и синий фильтры и накладываются одно на другое. Устройства, построенные по данному принципу, использовались на заре цветной фотографии и назывались тогда «хромоскопами Айвса» или «кромскопами» (Smith, 1967). Их современный эквивалент, именуемый «триноскопом», до сравнительно недавнего времени активно использовался в цветном телевидении (см. раздел 21.2).

3.6 ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД

Дифракционный метод построен на том, что три сепарации, модулированные тремя дифракционными решетками, накладываются друг на друга: исходно каждая сепарация освещается белым светом, а три дифракционных решетки различной частоты (или различной ориентации) используются в качестве красного, зеленого и синего фильтров. Метод непрактичен, поскольку пространственная приводка трихроматических сепараций при нем весьма затруднительна и к тому же артефакты на результирующем изображении излишне заметны (Kurtz, Eisen, и Higgins, 1971).

3.7 ПОГРЕШНОСТИ АДДИТИВНЫХ МЕТОДОВ

Самым простым подходом к повышению точности аддитивного цветовоспроизведения является подход, описанный в предыдущей главе:

⇨ К любому отклонению кривых чувствительности камеры от кривых ρ, γ и β следует относиться как к нарастанию погрешности, а оптимум для красного, зеленого и синего лучей искать в том, насколько они близки к раздельному возбуждению ρ-, γ- и β-колбочек.

В фотографических процессах, в которых при просмотре используется мозаика, аналогичная мозаике камеры, для возбуждения ρ-, γ- и β-колбочек задействуются красный, зеленый и синий потоки, составленные из очень широких спектральных полос и, следовательно, весьма далекие от оптимума. По этой причине в некоторых системах успешно используются специальные узкополосные фильтры (Sproson, 1949).

Подробно вопрос погрешностей аддитивного синтеза цветовых стимулов будет рассмотрен в 7-й главе.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Brown, W.R.J., Combs, C.S., and Smith, R.B., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 65, 648 (1956).
British Journal of Photography, 98, 456 (1951).
Crane, E.M., and Evans, C.H., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 65, 13 (1958).
Dressler, R., Proc. I.R.E., 41, 851 (1953).
Duke, V.J., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 72, 711 (1963).
Evans, C.H., and Smith, R.B., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 65, 365 (1956).
Federman, F., and Pomicter, D., J. Roy. Television Soc., 16, vii (May–June, 1977).
Kurtz, C.N., Eisen, F.C., and Higgins, G.C., Phot. Sci. Eng., 15, 343 (1971).
Law, H.B., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 86, 214 (1977).
Land, E.H., Phot. Sci. Eng., 21, 225 (1977).
Smith, R.C., Brit. J. Phot., 114, 1122 (1967).
Sproson, W.N., Phot. J., 89B, 108 (1949).

ЛИТЕРАТУРА

Cornwell-Clyne, A., Colour Cinematography, Chapman & Hall, London (1951).
Наррй, В., Brit. Kinematog. Sound Tel., 67, 58 (1985).
Koshofer. G., Brit. J. Phot., 113, 562 and 824 (1966).

4 СУБТРАКТИВНЫЙ ПРИНЦИП

4.1 ВВЕДЕНИЕ

В аддитивном цветовоспроизведении все требуемые цветовые стимулы создаются смешением в разных пропорциях трех первичных световых потоков (кардинальных стимулов) — красного, зеленого и синего. Субтрактивное цветовоспроизведение на первый взгляд кажется принципиально иным, поскольку требуемые цветовые стимулы образуются за счет трех совершенно разных красок, также взятых в разных пропорциях: сине-зеленой (cyan), пурпурной (magenta) и желтой (yellow). Однако на самом деле субтрактивные методы отличны от аддитивных лишь технологически, но не концептуально.

Фотографические аддитивные методы обладают двумя основными недостатками. Первый состоит в том, что в один из узлов системы визуализации должны быть вмонтированы красный, зеленый и синий фильтры. Эти фильтры можно расположить перед тремя проекторами (как в методе тройного проектирования); на вращающемся диске (как в методе последовательных кадров); в трех стрипах перед проекционным объективом (как в лентикулярном методе); или же, наконец, в микроячейках (как в мозаичном). Но везде, где используются такие фильтры, возникают неизбежные светопотери. Следовательно, в отличие от черно-белой, проекционная аддитивная фотография требует либо регулятора яркости изображения (причем по всему его полю), либо меньшего размера изображения (при той же интенсивности); либо высокой мощности проекционной лампы (а значит, более сложной системы охлаждения проектора). Все перечисленное создает ощутимые неудобства.

Коль скоро ниже речь пойдет об отражающих отпечатках, то сразу оговоримся, что в отношении них не действует ни один аддитивный метод, кроме разве что мозаичного, в котором, однако, мозаика красного, зеленого и синего (даже без какого-либо изображения позади нее) вместо белого способна воспроизвести лишь серый.

Второй недостаток аддитивных методов заключается в том, что их реализация требует использования специального оборудования (например, триплетных проекторов или некоторых особых видов мозаики), что всегда ведет к потере визуальной резкости изображения.

Привлекательность субтрактивного принципа (впервые описан Hauron в 1862 г.) — в преодолении вышеописанных трудностей.

Принцип субтрактивного цветовоспроизведения широко используется не только в фотографии, но и в полиграфии: проекционные изображения столь же контрастны, как и черно-белые, оттиски на отражение могут иметь доброкачественный белый, а при регистрации и показе могут использоваться обычные камеры и проекторы.

Правда, с точки зрения фотографии субтрактивный метод обладает собственными определенными недостатками: субтрактивные материалы по своей структуре существенно сложнее аддитивных и, следовательно, дороже; обработка субтрактивных фотоматериалов требует либо возврата отснятого материала на производство, либо обраще-

ния в специализированную лабораторию. И то, и другое неизбежно ведет к временны́м задержкам и в некоторой степени лишает любительскую фотографию ее прелести.

В цветном телевидении субтрактивный принцип не получил распространения, поскольку здесь с успехом применяются обычные аддитивные системы (т.е. использующие красно-, зелено- и синесветящиеся люминофоры) — они не требуют таких световых затрат, как в аддитивной цветной фотографии, где через красные, зеленые и синие фильтры пропускается белый световой поток и где четкость изображения ограничена числом стрипов.

4.2 СУБТРАКТИВНЫЙ ПРИНЦИП

Белый свет содержит все цветовые стимулы спектра, но мы рассматриваем спектр как состоящий из трех основных частей:

— первая — содержит свет с длинами волн больше 580 нм, то есть захватывает всю «красную» часть;

— вторая — содержит свет с длинами волн диапазона 490—580 нм, то есть захватывает всю «зеленую» часть;

— третья — содержит свет с длинами волн менее 490 нм, захватывая всю «синюю» часть спектра.

Если свет каждой из частей спектра по отдельности воздействует на нашу зрительную систему, у нас возникают три самостоятельных цветовых ощущения: красное, зеленое и синее. Следовательно, мы можем говорить, что белый свет представляет собой аддитивную смесь красного, зеленого и синего световых потоков (в том числе свет проектора, падающий на белый экран или отраженный от него, или дневной свет, освещающий белый лист бумаги). Таким образом, все, что необходимо для воспроизведения зрительных стимулов полного цветового диапазона, заключенных в белом свете, — это какой-либо способ независимой регулировки «красной», «зеленой» и «синей» долей спектра (du Hauron, 1869).

На рис. 4.1 (а) дан график спектрального коэффициента пропускания желтой краски при ее четырех различных концентрациях. Мы видим, что во всех четырех случаях пропускание по «красной» части спектра остается высоким, — практически около 100%. В «зеленой» части вариабельность пропускания в зависимости от концентрации невелика, но в «синей» части спектра пропускание явно зависит от концентрации красителя. Следовательно, если в проектор поместить слайд, концентрацией желтого красителя которого можно управлять, то по мере изменения этой концентрации количество синего света, падающего на экран, будет меняться в целом независимо от количества зеленого и красного света. Аналогично количество синего света, отраженного от листа белой бумаги, рассматриваемой на дневном свету, будет меняться в зависимости от концентрации желтой краски на ее поверхности.

На рис. 4.1 (b) даны кривые спектрального коэффициента пропускания пурпурной краски (magenta) при ее различных концентрациях. Ясно, что основным эффектом от изменения концентрации этой краски будет изменение пропускания в «зеленой» части спектра. Очевидно, что пропускание в «синей» и «красной» частях также меняется, но весьма незначительно.

Наконец, на рис. 4.1 (c) даны кривые спектрального коэффициента пропускания голубой краски (cyan) при различных концентрациях. Понятно, что основным эффектом от изменения ее концентрации является изменение пропускания в «красной» части спектра (а пропускание в «зеленой» и «синей» частях будет меняться незначительно).

Таким образом, если мы можем менять концентрацию голубой (cyan), пурпурной (magenta) и желтой (yellow) красок (например, в слайде или на листе бумаги), мы получаем возможность менять интенсивность «красной», «зеленой» и «синей» составляющих белого света (т.е. интенсивность красного, зеленого и синего кардинальных стимулов) и, следовательно, можем воспроизводить широкий диапазон цветовых стимулов разной интенсивности. Сказанное и являет собой суть субтрактивного принципа воспроизведения цветовых стимулов (цветовоспроизведения).

Ясно также, что хотя сами по себе cyan, magenta и yellow участвуют в создании стимулов голубого, пурпурного и желтого цветовых ощущений, важнее то, что они являются соответственно «красно»-поглощающим, «зелено»-поглощающим и «сине»-поглощающим веществами. В печатном деле цвета первых двух красок порой ошибочно именуют «синим» и «красным», но их реальная функция (поглощение соответственно красного и зеленого света) от этого, разумеется, не меняется.

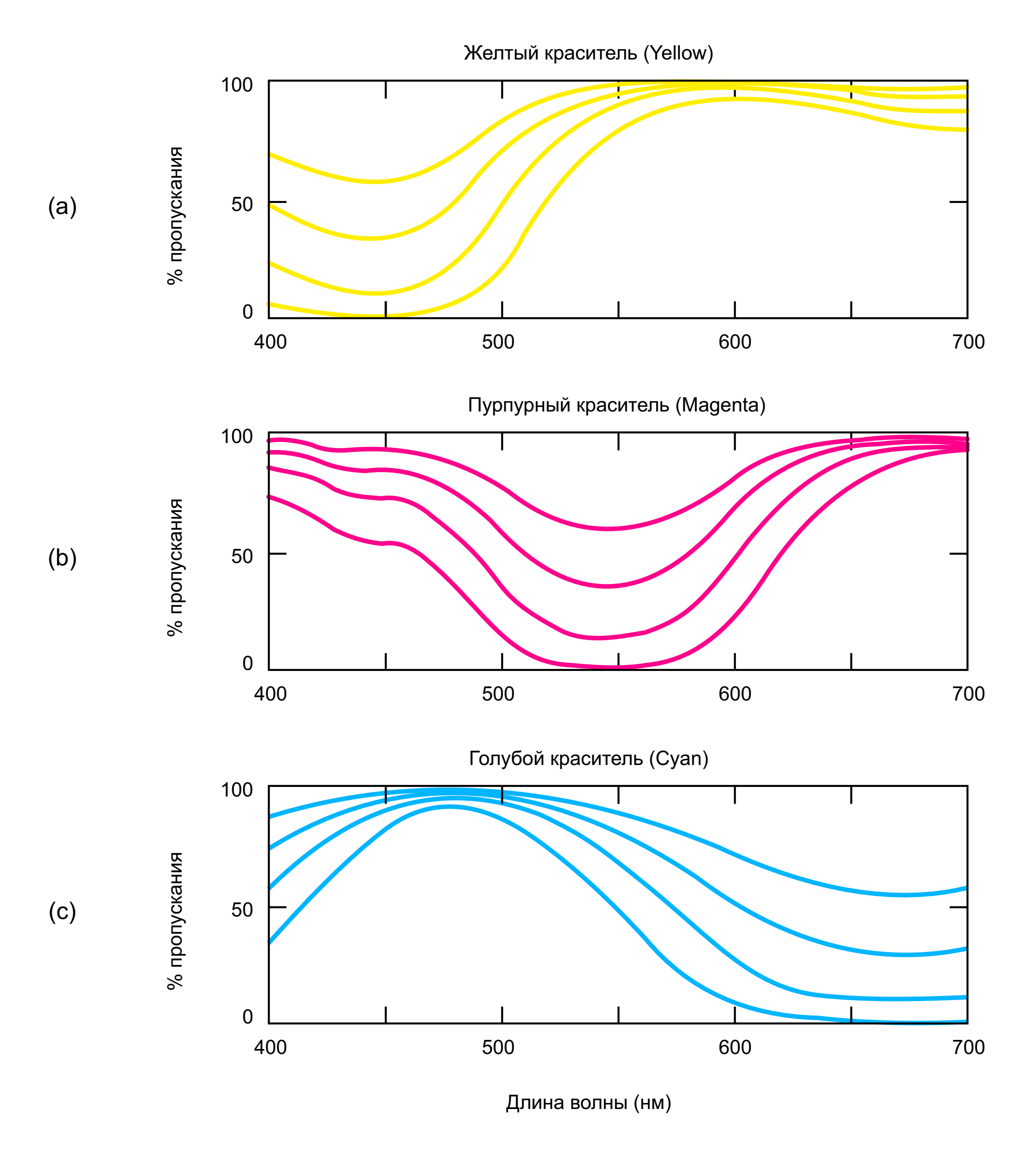


Рис. 4.1 Кривые спектрального пропускания желтого (a), пурпурного (b) и голубого (c) красителей при четырех различных концентрациях.

Итак, все, что необходимо для реализации принципа субтрактивного цветовоспроизведения, — это возможность независимого управления концентрацией трех красителей в каждой точке слайда или бумаги. Предположив, что таковое возможно, перечислим этапы субтрактивной цветной фотографии (печати):

1. Черно-белая регистрация оригинальной сцены, выполняемая за счет красного, зеленого и синего света (как в аддитивных системах).

2. Получение красочных позитивов с позитивов черно-белых: позитив, зарегистрированный красным светом, воспроизводится голубой краской (cyan); зарегистрированный зеленым светом — пурпурной краской (magenta); зарегистрированный синим светом — желтой краской (yellow).

3. Три изображения, наложенные друг на друга и точно приведенные, рассматриваются при белом свете (см. рис. 26.7).

В цветных пленках и бумагах взаимоприводка трех изображений реализуется автоматически — за счет фотоэмульсионных слоев, расположенных один над другим по принципу «*триединого пакета*» («*integral tri-packs*») на общей пленочной или бумажной подложке. Последующая обработка материала производится так, чтобы в соответствующих слоях образовались изображения, состоящие из голубого, пурпурного и желтого красителей. Стоит сказать, что слои фотоматериалов выполняются сверхтонкими, дабы минимизировать потерю резкости, возникающую из-за рассеивания света верхними слоями. Обычная толщина полного пакета эмульсионных слоев в цветных пленках составляет примерно от 5 до 10 μm, т.е. около 0.1 толщины человеческого волоса (подробнее см. в главах 12 и 18).

4.3 ИЗДЕРЖКИ СУБТРАКТИВНОГО ПРИНЦИПА

В большинстве случаев результат современного субтрактивного цветовоспроизведения настолько зрительно комфортен, что создается впечатление безупречной цветопередачи. Отметим однако, что все субтрактивные процессы грешат не только т.н. паразитным колбочковым возбуждением, свойственным аддитивным методам (описаны во 2-й главе), но также и собственными недостатками.

4.3.1 Паразитное колбочковое возбуждение

На рис. 4.2 показаны возможные кривые чувствительностей колбочек трех типов (ρ-, γ- и β-), действующих в сетчатке человека. Пока мы можем считать, что (как и в аддитивных процессах) получение корректной цветовой репродукции потребует трех фотоэмульсий с эффективными чувствительностями, спектральный график которых подобен этим кривым. Таковое достижимо, но при том условии, что голубой краситель (cyan) будет управлять светом такой спектральной полосы, при которой на этот свет отвечают только ρ-колбочки, пурпурный — светом такой полосы, при которой отвечают только γ-колбочки, и желтый — светом полосы, при которой отвечают только β-колбочки.

На рис. 4.2 показаны примерные спектральные полосы, за которые «ответственны» голубая, пурпурная и желтая краски, — ясно, что, как и в аддитивном процессе, стимулы, характер и интенсивность которых управляются этими тремя красками, не могут воздействовать исключительно на ρ-, γ- и β-колбочки, и, следовательно, безупречное субтрактивное цветовоспроизведение невозможно. В аддитивных системах красный, зеленый и синий световые потоки спектрально у́же, чем те, что управляются субтрак-

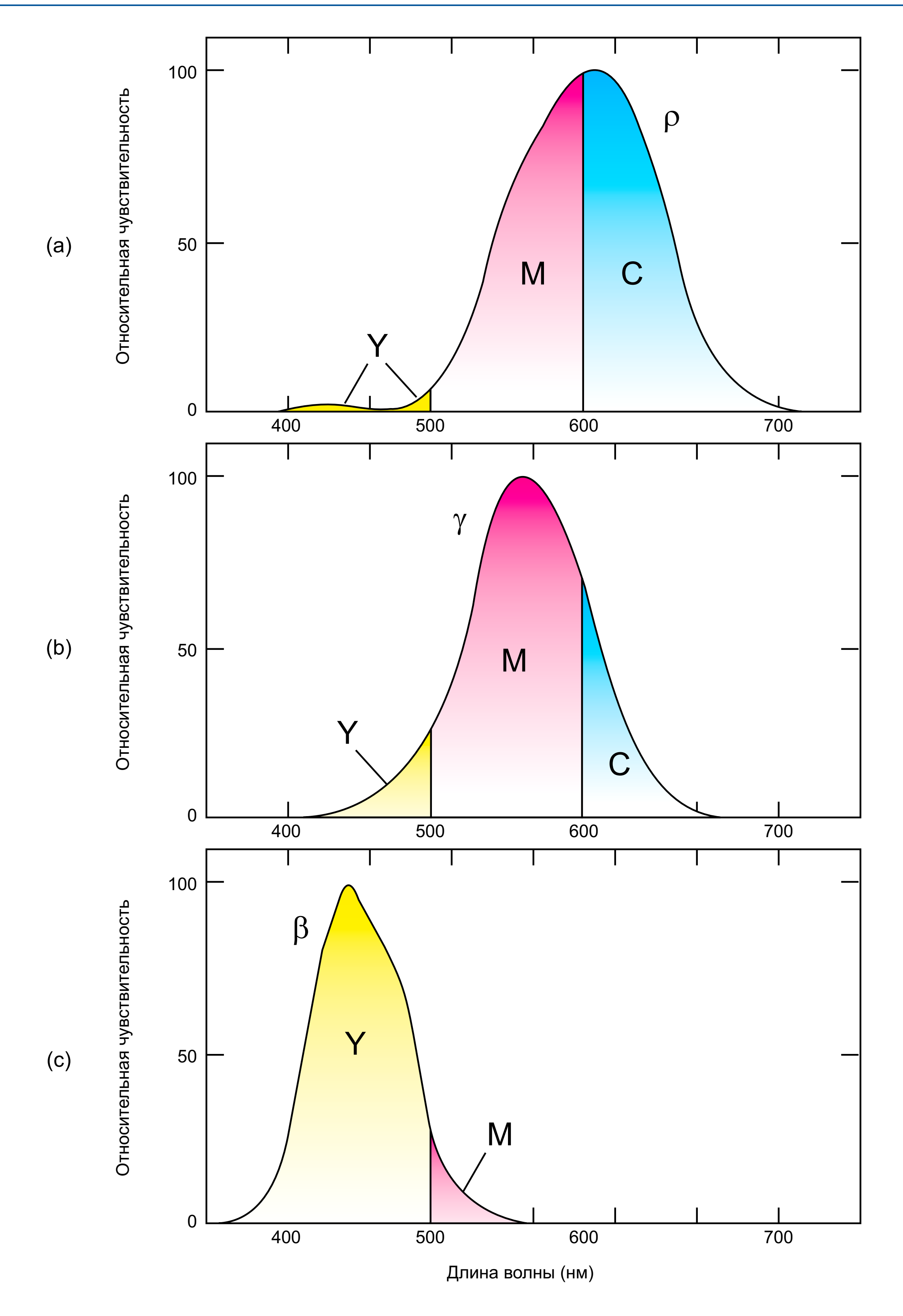


Рис. 4.2 Области, отмеченные как C, M, и Y, демонстрируют колбочковые отклики (величины откликов зависят от степени поглощения «красного», «зеленого» и «синего» компонентов белого света соответственно голубой, пурпурной и желтой красками). В идеальной системе каждая из красок будет регулировать только «свой» вид колбочкового отклика.

тивными красителями, и даже теоретически аддитивные системы превосходят субтрактивные по данному параметру. На практике, однако, между аддитивным и субтрактивным процессами нет особой разницы из-за необходимости обеспечивать высокие световые уровни при аддитивном цветовоспроизведении, о чем говорилось ранее.

4.3.2 Паразитное поглощение

Следующий недостаток субтрактивных систем состоит в том, что голубой, пурпурный и желтый красители заметно поглощают свет в тех частях спектра, где должны были бы иметь 100% пропускания (см. рис. 4.1). То есть, мы говорим о *паразитном поглощении* (*unwanted absorption*), вследствие которого результирующие цветовые стимулы получаются существенно более темными, чем в оригинальной сцене (если не сделана необходимая коррекция).

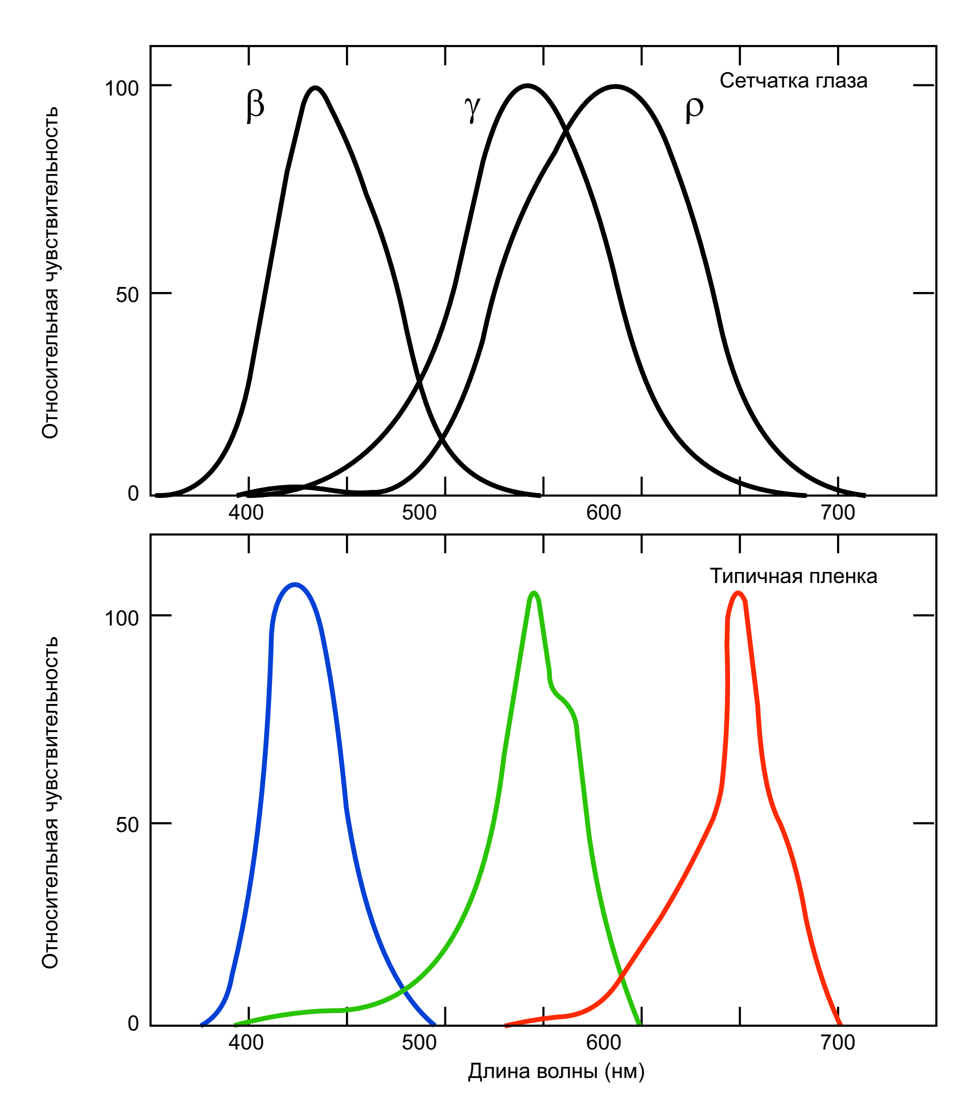


Рис. 4.3 Типичные спектральные чувствительности субтрактивных цветных пленок в сравнении с вероятными чувствительностями трех цветовых механизмов зрения.

4.3.3 Пути компенсации недостатков субтрактивного метода

Дабы свести к минимуму влияние основных недостатков субтрактивных процессов применяются разные, и порой весьма эффективные, средства.

4.3.3.1 Повышение коэффициента контрастности репродукции

Увеличить полноту цвета всех воспроизводимых стимулов (правда в ущерб качеству тоновой составляющей изображения) позволяет сознательное повышение контрастности репродукции по отношению к оригиналу. Однако отметим, что корректность тоновой составляющей репродукции не всегда критична при получении «красивой картинки», а в некоторых случаях повышение контрастности даже улучшает тонопередачу. Сказанное справедливо, в частности, в отношении сцен комнатного освещения — некоторые современные субтрактивные процессы удачно задействуют высококонтрастную обработку фотоматериалов, на которых зафиксированы сцены, снятые при комнатном освещении (плодом чего являются весьма выразительные изображения).[1]

4.3.3.2 Увеличение диапазона спектральной чувствительности сепараций

Другим весьма удачным приемом является расширение диапазона спектральной чувствительности трех сепараций в сравнении с теми, что показаны на рис. 4.2. Типичный набор спектрально-расширенных кривых показан на рис. 4.3. И вновь, как и в случае повышения контрастности репродукции, полнота цвета большинства стимулов вырастает, но при этом иногда возникают погрешности в передаче их цветового тона и светлоты (подробно см. в разделе 9.5).

4.3.3.3 Разноуровневая экспозиция

Еще одним приемом, повышающим полноту цвета результирующих стимулов, является неодинаковый уровень экспозиции слоев фотоматериала, что достигается либо за счет т.н. *межслойного эффекта* (*inter-image effect*), либо за счет т.н. *маскирования* (см. гл. 15).

* * *

Очевидно, что три описанных способа не могут устранить основные недостатки субтрактивного процесса, истоки которых в физиологии цветовосприятия и форме кривых спектрального поглощения даже самых лучших красителей. Основное требование, предъявляемое к современным субтрактивным процессам, состоит в том, чтобы они воспроизводили цветные изображения *визуально комфортно* и чтобы неизбежные погрешности были минимально заметными.

---

[1] В 6-й главе мы покажем, что в случае репродуцирования в темном окружении, как, к примеру, при демонстрации слайдов или кинофильмов, изображения должны иметь бо́льшую контрастность, чем при просмотре со средней фотометрической яркостью окружения. Повышение контрастности необходимо для того, чтобы самые темные области сцены воспринимались черными, поскольку темное окружение обладает бо́льшим эффектом повышения светлоты в отношении темных объектов, нежели светлых (см. рис. 5.2). Плюс к тому, темное окружение может понизить полноту цвета элементов изображения, если площадь последних достаточно велика и если они при этом находятся в непосредственной близости к границе изображения и его окружения (см. раздел 6.8).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Du Hauron, L. Ducos, The Photographic News, 13, 319 (1869).

ЛИТЕРАТУРА

Evans, R.M., Eye, Film, and Camera in Color Photography, Wiley, New York (1959).

5 ВИЗУАЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ

5.1 ВВЕДЕНИЕ

Издержки цветовоспроизведения в трихроматической фотографии, трихроматической полиграфии и трихроматическом телевидении порой становятся заметны наблюдателю: воспроизведение некоторых специфических цветовых стимулов иногда оказывается явно некорректным. К примеру, зачастую имеет место выраженная тенденция к падению насыщенности, в особенности субъективно-ярких цветовых стимулов, которые на изображении сцены утрачивают хроматический компонент и начинают восприниматься белыми.

До недавнего времени в цветной фотографии существовала еще одна проблема: лепестки синих цветов на отпечатках и слайдах воспроизводились розовыми (при этом прочие элементы сцены выглядели вполне удовлетворительно). Причина заключалась в том, что синий цветок вдобавок к отражению в сугубо «синей» части спектра (отражению, воспроизводящему стимул, вызывающий синее ощущение) отражает свет также и в его сугубо «красной» (концевой) области. Свет последней весьма слабо воздействует на зрение (поскольку в данной части спектра чувствительность человеческой сетчатки низка), однако цветные фотопленки в этом диапазоне длин волн обычно обладают высокой чувствительностью (см. рис. 4.3), и цветок на фотопленке получается краснее.

Сравнительно недавно удалось понизить чувствительность фотопленок в предельно «красной» части спектра (приблизив ее к свойствам сетчатки), благодаря чему регистрация и, соответственно, воспроизведение синих цветовых стимулов стали ощутимо лучше. Насыщенность красных удалось сохранить за счет усиления т.н. межслойного эффекта (см. раздел 15.5)[1].

Вместе с тем, несмотря на неспособность простых трихроматических методов к колориметрически точному цветовоспроизведению, неудовлетворительный результат является скорее исключением, нежели правилом. Более того, измерения указывают на то, что основная проблема состоит в недостаточной насыщенности элементов репродукции (по причине паразитного колбочкового возбуждения — см. рис. 2.3, 2.4 и 4.2), а также, в случае субтрактивного цветовоспроизведения, в их темноте (по причине паразитного светопоглощения красителями — см. рис. 4.1). Вместе с тем стимулы, далекие от бледных или темных, часто воспринимаются пользователем слишком насыщенными и чересчур субъективно-яркими, то есть, как говорят, процесс «задирает» цвета.

Так или иначе, несмотря на то что объективные измерения свидетельствуют об ущербности трихроматических цветовоспроизводящих процессов как при цветной

---

[1] Чтобы получить достоверные синие оттенки на старых фотопленках рекомендовалось использовать набор фильтров Kodak Wratten 66, 85B или CC50M и CC20M (пленки дневного света), но при этом требовалось увеличение экспозиции до 60 крат [Reef, 1965].

съемке, так и при просмотре отпечатков, — описанные дефекты чаще всего визуально незаметны.

Дабы объяснить очевидное противоречие, напомним, что цветовые стимулы хоть и описываются физическими величинами (такими как коэффициенты спектрального отражения или пропускания[1]), воспринимаются они нашим сознанием в виде цветовых ощущений. Следовательно, о физиологической стороне проблемы должно говорить не меньше, чем о физической.

5.2 НА ЧЕМ СТРОИТСЯ ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕПРОДУКЦИИ?

Давайте поговорим о том, на чем строится наша оценка цветовой репродукции.

Лишь в ряде случаев (как, скажем, в случае «моментальной» фотографии) оригинальная сцена и ее репродукция рассматриваются одновременно. Намного чаще изображение сцены визуально оценивают через некоторый промежуток времени, составляющий от нескольких часов до нескольких недель (а порой месяцев и лет). Следовательно, в формировании нашего суждения о цветовой репродукции очень важную роль играет человеческая зрительная память. Можно было бы утверждать, что процесс визуальной оценки результатов цветовоспроизведения строится на ментальном сравнении восприятия репродукции с воспоминанием о цветовом восприятии оригинального объекта в момент создания его изображения. Однако же обычный человек способен судить об изображениях объектов, которых никогда не видел, и из тех времен, в которые никогда не жил. То есть, как правило, цвета репродукции оцениваются не токмо что не в сравнении с оригинальными объектами, но даже не в сравнении с воспоминанием о них. Тогда за счет чего мы все-таки выносим суждение?

Судя по всему, не существует никаких альтернатив той идее, что основу оценки чаще всего составляет сравнение цветового восприятия объектов репродукции с воспоминанием о цветовом восприятии *подобных* объектов, то есть восприятии, когда-то имевшем место в жизненном опыте наблюдателя (Bartleson, 1959 и 1960).

Еще один пример — трава, весьма частый компонент цветных изображений. Когда мы пытаемся оценить, насколько точно воспроизведен стимул ее цвета, мы проводим ментальное сравнение цветового восприятия репродукции и нашего общего представления о зеленой траве. Измерения свидетельствуют о том, что трихроматические процессы плохо передают оттенки зеленого и что воспроизведенные стимулы явно более темные и менее насыщенные, чем должны быть. Почему же тогда цвет травы на изображениях оценивается как почти идеальный?

Дело в том, что оригинальный цвет травы варьирует в весьма широком диапазоне оттенков и зависит как от ее сорта, так и от влажности почвы, освещения (его направ-

---

[1] Физически стимул описывается спектральным распределением энергии излучения, поскольку цветовой стимул — это «...видимое излучение, попадающее в глаз и вызывающее ощущение либо хроматического цвета, либо ахроматического» (Международный электротехнический словарь. Глава 845: Освещение. С. 68 / CIE-IEC, 1987 г.). Однако поскольку спектральное распределение энергии стимула, полученного за счет отражения света от объектов, непосредственно зависит от спектрального коэффициента отражения (пропускания) поверхности и спектрального распределения энергии падающего на нее излучения, большинство исследователей позволяют себе говорить о спектральном коэффициенте отражения (пропускания) как о физической характеристике стимула. — *Прим. пер.*

ления, цветности и интенсивности), прозрачности атмосферы, времени года и даже от цвета и размера объектов, находящихся на поляне или вокруг нее. Короче говоря, наш стереотип сравнения (воспоминание о типичном цвете травы) остается весьма неопределенным, и, следовательно, если репродукция содержит цветовой стимул из возможного диапазона стимулов, предъявляемых реальной травой, мы вполне удовлетворяемся этим. Стоит сказать также, что естественная стимульная вариативность реальных объектов, безусловно, значима, но не является при этом серьезным препятствием относительному постоянству цветового восприятия этих объектов.

Цветовое восприятие — это одна из множества сложнейших функций нашего организма, едва постижимая разумом. На первый взгляд, мы можем говорить, что воспоминания дают нам некий *сборный* образ «зеленой травы», благодаря которому наша оценка репродукции будет определенной и весьма точной. Но сие далеко от истины.

На рис. 5.1 приведена попытка схематичного представления факторов, наглядно демонстрирующих сложность обсуждаемого вопроса. Верхняя линия представляет процесс зрительного восприятия изображения травы: свет от изображения попадает в глаз наблюдателя, в результате чего информация в виде пакета неких сообщений передается в мозг. Эти сообщения интерпретируются нашим сознанием в цветовые ощущения, согласованные с изображением травы.

Нижняя линия представляет аналогичную цепочку по реальной траве, цветовые ощущения от которой фиксируются в памяти.

Цветовое восприятие изображения травы будет зависеть от физических параметров освещения, от физиологического статуса адаптации зрения при наблюдении, а также от психологического воздействия изображения (или его части) на наблюдателя. Аналогично цветовое восприятие оригинального объекта (в данном случае, напомним, травы) зависит от физических, физиологических и психологических условий наблюдения. Условия эти не только отличны от условий, при которых рассматривается репродукция, — они еще и меняются день ото дня и от участка к участку сцены.

Из сказанного следует, что результирующее цветовое сравнение изображения травы с нашим представлением о ее обычном цвете (схематично показано в правой части рис. 5.1) на каждом этапе усложняется за счет посторонних воздействий. Последние не просто «затуманивают» наше впечатление о цвете объектов, но препятствуют высокоточному цветовому сравнению. Ниже мы будем подробно говорить об этих воздействиях в контексте вариативности цветового тона, светлоты (означающей относительную субъективную яркость — см. раздел 7.2) и полноты цвета.

5.3 ВАРИАЦИИ ВОСПРИЯТИЯ ПО ЦВЕТОВОМУ ТОНУ

Вновь вернемся к траве: ее цветовой тон будет в значительной степени зависеть от сорта (один сорт желто-зеленый, другой — сине-зеленый); или от времени года (весенняя травка, например, желтее осенней). Сказанное относится и к листве, диапазон тонов которой даже больше: весной она светящаяся желто-зеленая, летом — зеленая, желтая ранней осенью и красная или коричневая осенью поздней. Цветовой тон фруктов зависит от их спелости: неспелый плод, как правило, зелен, но по мере созревания его цвет проходит через оттенки желтого к оранжевому или к красному. Кожа европеоида в зависимости от ее типа и степени загара варьирует по цвету от светло-розового или почти белого до различных оттенков коричневого. У других рас цвет кожи меняется от желтоватого до темно-коричневого или черного.

Цветовой тон любых объектов весьма изменчив и зависит от цвета их фона: цвето-

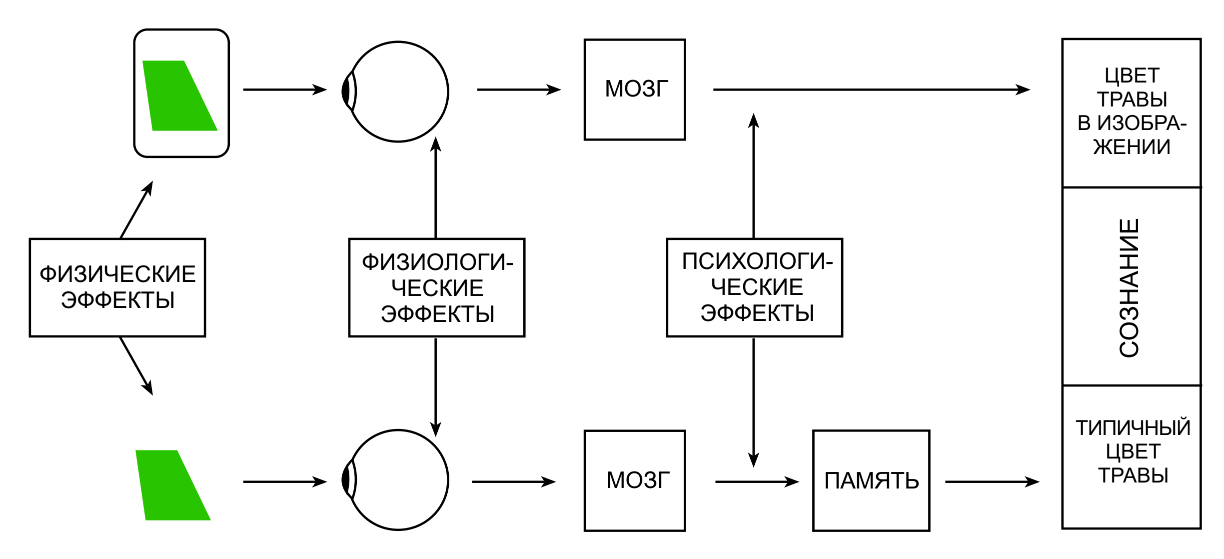


Рис. 5.1 Схематичное представление процессов, имеющих место при рассматривании цветовой репродукции травы (верхняя линия) и оригинальной травы (нижняя линия). Физические, физиологические и психологические эффекты разнятся в обоих случаях (а также в разных областях оригинала). Следовательно, ментальный стереотип типичного цвета травы (памятный цвет травы) весьма неопределен, в результате чего неизбежное падение полноты цвета зеленой травы на многих цветовых репродукциях часто остается незамеченным (что также относится и ко многим другим цветам).

вой тон зелени дерева, к примеру, будет меняться, если вначале смотреть на крону на фоне синего неба, а затем — на фоне коричневой земли.

Спектральный состав освещения также влияет на цветовой тон: если, например, солнце низко над горизонтом — свет желтоватый, и хотя зрение физиологически компенсирует эту желтизну — компенсация лишь частичная, и предметы, освещенные низким солнцем, все равно будут выглядеть желтыми. Кроме того, хорошо известно, что цвета многих объектов сильно меняются при переходе от дневного освещения к искусственному, например объекты, сиреневые на дневном свету, при лампах накаливания смотрятся краснее.

5.4 ВАРИАЦИИ ВОСПРИЯТИЯ ПО СВЕТЛОТЕ

Светлота цвета поверхностей зависит от многих факторов, в частности таких, как угол освещения (см. рис. 6.5) и атмосферная дымка, которая может высветлять темные объекты сцены и затемнять отдаленные светлые (рис. 5.6).

Как и в случае с цветовым тоном, фон играет важную роль: темный фон ведет к осветлению зрительного ощущения при восприятии стимулов, светлый — к затемнению. Данный эффект проиллюстрирует рис. 5.2, на котором два серых патча отражают строго одинаковое количество света, но патч на темном фоне воспринимается светлее, чем патч на фоне светлом.

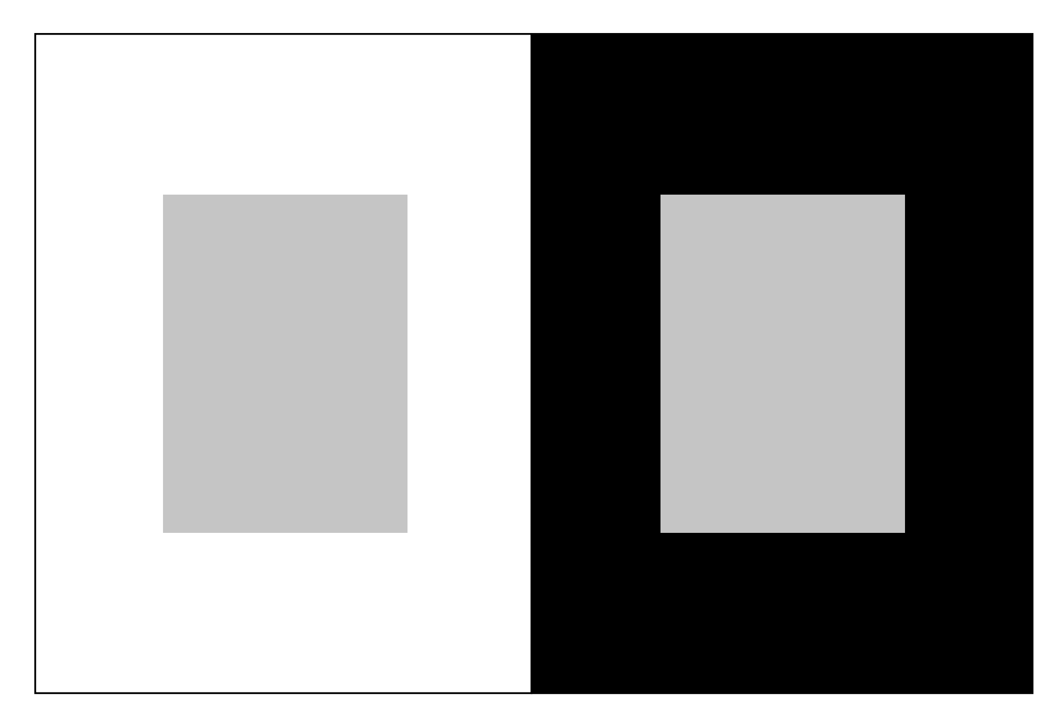


Рис. 5.2 Два серых прямоугольника, отражающих абсолютно одинаковое количество света, в разных окружениях воспринимаются по-разному: прямоугольник в черном окружении выглядит светлее, чем в белом.

5.5 ВАРИАЦИИ ВОСПРИЯТИЯ ПО ПОЛНОТЕ ЦВЕТА

Полнота цвета стимулов еще более вариабельна, чем их цветовой тон и светлота.

5.5.1 Влияние адаптации зрения на полноту цвета воспринимаемых стимулов

Из опыта известно, что многие сцены выглядят уныло и мрачно при облачной погоде, но «расцветают», когда появляется солнце, — мы говорим при этом, что растет полнота цвета объектов этих сцен. Полнота цвета тем выше, чем выше уровень освещенности сцены и чем направленнее это освещение (в противоположность рассеянному).

При фотосъемке колебания уровня освещенности не влияют на результат, поскольку полностью компенсируются диафрагмированием и/или изменением времени экспозиции. Зрительная система не может управлять временем экспозиции, а зрачковый контроль ограничен диапазоном интенсивностей 8:1, поэтому бóльшая часть управления приходится на изменение фактической чувствительности различных механизмов сетчатки.

Всем хорошо известно, что первое время трудно передвигаться по тускло освещенной комнате, войдя в нее с солнечной улицы. Спустя несколько минут, однако, чувствительность сетчатки существенно повышается, и мы начинаем видеть лучше. Данное изменение чувствительности, именуемое *адаптацией*, сопровождается весьма серьезными изменениями в цветовом восприятии, в результате чего цветовые стимулы вос-

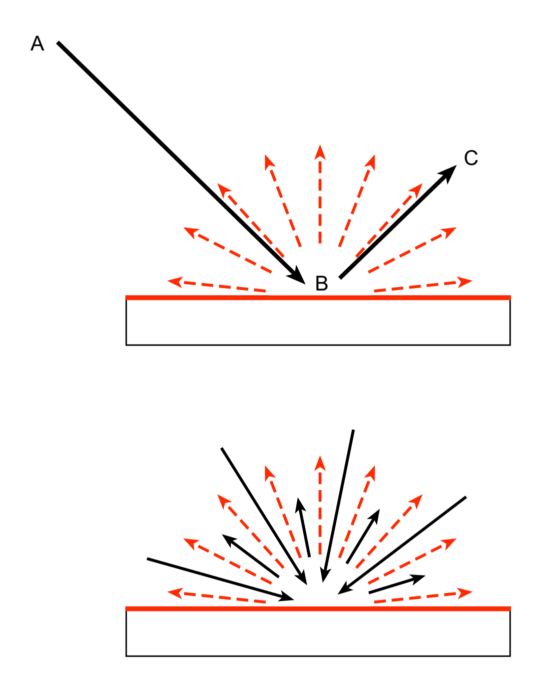


Рис. 5.3 Схематичное объяснение влияния рассеяного света на полноту цвета: сплошные линии означают белый свет, пунктирные — «окрашенный» свет. На верхней диаграмме на поверхность падает строго направленный свет (AB). Когда поверхность рассматривается под любым углом, кроме CB, в глаз попадает только «окрашенный» свет, рассеянный поверхностью.

На нижней диаграмме поверхность освещена рассеянным светом. Независимо от направления просмотра «окрашенный» свет, рассеянный поверхностью, всегда смешивается с определенным количеством белого света, зеркально отраженного от ее поверхностного слоя.

принимаются менее насыщенными, если их интенсивность мала, и более насыщенными, если их интенсивность велика.

Весьма экстравагантным примером, иллюстрирующим сказанное выше, является восприятие стимулов, полученных при лунном свете (то есть тогда, когда полнота их цвета полностью редуцирована и они неотличимы от серых).[1] Уже в сумерках все цвета становятся весьма «вялы», но даже на более высоких уровнях освещенности упомянутый эффект не пропадает полностью. По этой причине цветовые репродукции смотрятся тем лучше, чем сильнее они освещены (Bartleson, 1965).

5.5.2 Влияние поверхностных отражений на полноту цвета

Другой эффект является следствием того, что все поверхности (неважно, окрашены они или нет) отражают от своего поверхностного слоя определенную долю падающего

[1] Данное утверждение несколько формализовано: ощущение серого (нейтрального) — сугубо фотопическое, инициированное колбочковым ответом, то есть именно *цветовое* ощущение, хотя и считающееся ахроматическим (равноудаленным от маргинальных насыщенностей по всем возможным цветовым тонам). При палочковом зрении ощущение полутонов весьма специфично, и его вообще трудно охарактеризовать, тем более как «серое». Убедиться в неоднозначности «серого» при палочковом зрении легко, сосредоточившись на своих ощущениях в скотопических условиях просмотра, например при лунном свете или в едва освещенной комнате. — *Прим. пер.*

света, которая является дополнительной к свету, отраженному от толщи поверхности. Свет, отраженный от поверхностного слоя, по цвету сходен с осветителем (за исключением металлов), и, таким образом, когда окрашенные поверхности рассматриваются при белом свете, некоторое его количество добавляется к «окрашенному» свету, отраженному от толщи этой поверхности. В результате полнота цвета поверхности падает.

Большинство поверхностей обладают той или иной степенью глянца, и это значит, что при направленном освещении свет, отраженный от поверхностного слоя, должен идти преимущественно в одном направлении и сравнительно редко попадать в глаз. Следовательно, на сетчатку воздействует только «окрашенный» свет, рассеянный толщей поверхности, и его полнота цвета практически не снижается. С другой стороны, независимо от направления просмотра «окрашенный» свет, диффузно рассеянный толщей поверхности, всегда будет смешиваться с некоторым количеством белого света, зеркально отраженного от поверхностного слоя (см. рис. 5.3). Из вышесказанного следует также и то, что матовые поверхности, отражающие свет по всем направлениям, всегда обладают меньшей полнотой цвета, чем глянцевые, при прочих равных физических характеристиках (см. рис. 5.4.).

То, что световая и темновая адаптации ведут к вариабельности полноты цвета, — несомненный факт, который, однако, мало радует, поскольку многие цветные изображения ярко освещенных уличных сцен рассматриваются при низких уровнях освещения. Впрочем, данный эффект иногда способствует улучшению изображения, к примеру: цветную фотографию, сделанную мрачным пасмурным днем, можно рассматривать на ярком свету, получив тем самым бóльшую полноту цвета ее элементов.

Отметим, что цветное фото можно сделать даже при лунном свете. При столь малых уровнях освещения зрительные стимулы воспринимаются с очень низкой полнотой цвета. Но если сделать цветной снимок с очень длинной экспозицией (в миллион раз превышающей время экспозиции на солнечном свету) все стимулы будут воспроизведены в точности так, как если бы фотография была сделана ясным днем. Таким образом, если рассматривать снимок на ярком свету, его восприятие будет намного более полноцветным, чем восприятие оригинала.

5.5.3 Прочие физические факторы

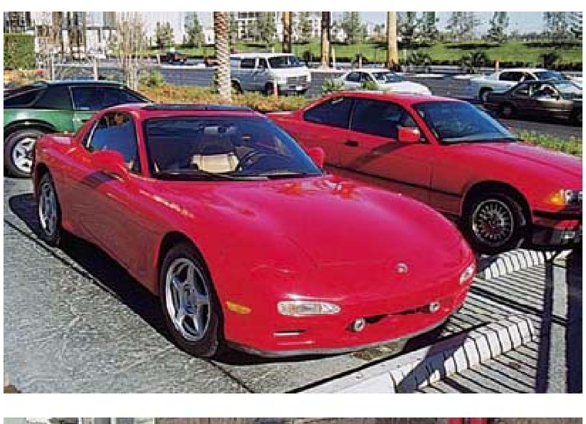
Атмосферная дымка понижает полноту цвета отдаленных объектов за счет абсорбции части «окрашенного» света, от них отраженного, и смешивания его с белым светом. Прозрачный воздух, напротив, радикально повышает полноту цвета отдаленных объектов (см. рис. 5.5 и 5.6).

Очевидно, что пыль на поверхностях снижает их полноту цвета, абсорбируя некоторое количество «окрашенного» света и смешивая его с белым. Пыль быстро собирается на уличных предметах при жаркой и сухой погоде и моментально исчезает под дождем, но некоторые окрашенные поверхности при намокании очень сильно повышают свою полноту цвета даже при отсутствии пыли.

Цветность освещения также может повлиять на полноту цвета, причем даже несмотря на адаптацию.

Полнота цвета неба сильно зависит от состояния атмосферы и высоты солнца над горизонтом: ее диапазон простирается от белого возле самого солнца (особенно когда небо в дымке) до глубокого синего вдали от него (особенно при ясной погоде).

Наконец, разная степень синевы воды объясняется вариабельностью последней по полноте цвета (см. рис. 5.7).







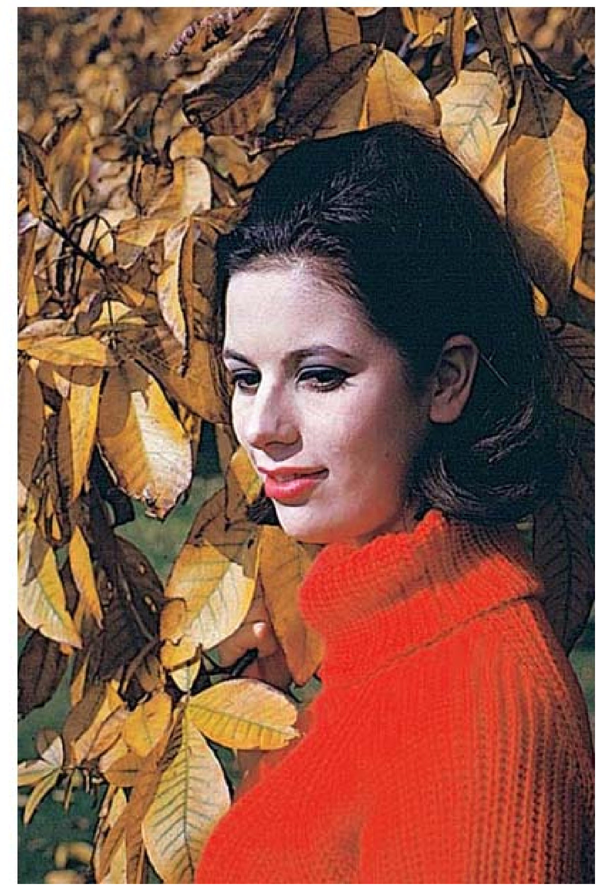


Рис. 5.4 Свет, отраженный от поверхностного слоя большинства предметов, обычно белый. В случае направленно освещенных глянцевых объектов (слева вверху) этот свет ограничен зеркальным отражением и не снижает полноты цвета при иных углах просмотра. В случае матовых объектов (справа вверху) белый свет отражается по всем направлениям и снижает полноту цвета при любом угле просмотра (см. рис. 5.3). Светлые предметы, отраженные в глянцевых поверхностях, понижают полноту цвета этих поверхностей, что видно в нижней части надписи «Harrow on the Hill» (слева внизу). Некоторые матовые объекты, такие как шерсть и бархат (справа внизу), благодаря многократным переотражениям между волосками, белого света отражают очень мало.

5.6 ПРИОРИТЕТЫ ВОСПРИЯТИЯ

5.6.1 Цветовой тон

Поскольку большинство вышеописанных эффектов (влияние атмосферной дымки, вариативность освещения от направленного до рассеянного, присутствие пыли или воды на поверхностях, адаптация и пр.) приводят к изменениям в полноте цвета стимулов, притом что лишь немногие из них ведут к изменениям в цветовом тоне, — наши ментальные стереотипы цветового тона точнее, чем стереотипы полноты цвета. Таким

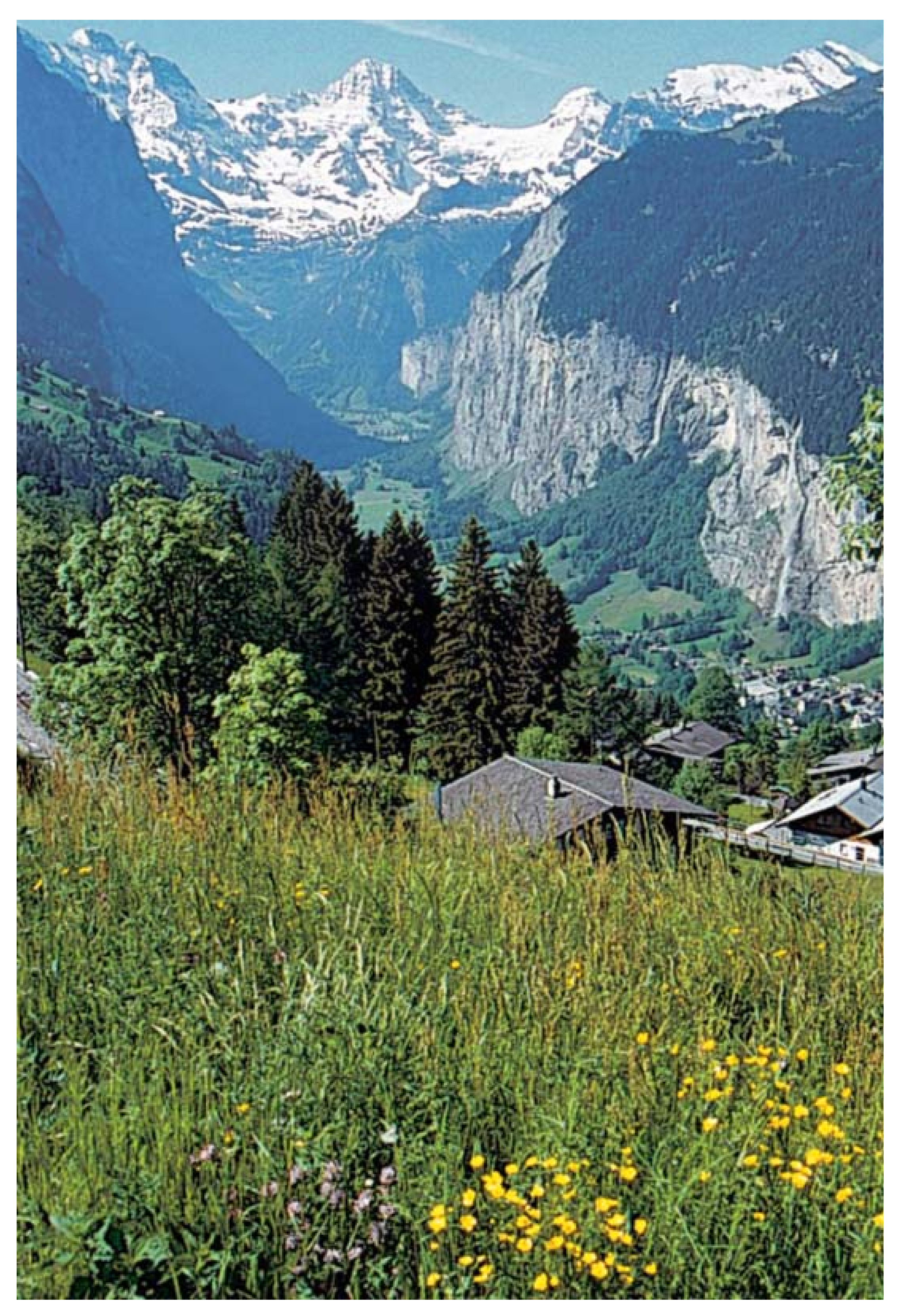


Рис. 5.5 См. подпись к рисунку 5.6.



Рис. 5.6 Атмосферная дымка, туман, смог или пыль в воздухе обычно смешивают свет, отраженный от предметов, с белым светом, тем самым снижая полноту цвета последних. Действительно, более близкие к камере объекты зафиксированы через очень тонкий слой воздуха, а более удаленные явно потеряли полноту цвета благодаря дымке. Паразитная подсветка объектива, проекционного экрана или отражающих отпечатков влияет на полноту цвета аналогичным образом.

Смешение с белым светом (будь то влияние атмосферы или паразитная подсветка) также оказывает серьезное влияние на тоновую составляющую репродукции: воздействие больше проявляет себя в темных участках изображения, поскольку добавка определенного количества паразитного света дает большее приращение фотометрической яркости темных стимулов, нежели светлых, а отклик зрительной системы примерно пропорционален этому приращению.

В цветном телевидении влиянию белого света можно противостоять за счет регулировки уровня черной точки (см. разделы 19.13 и 23.14), что в равной степени справедливо как в отношении телекамер, так и в отношении телеприемников.

В фотографии для противодействия влиянию паразитной подсветки (возникающей в объективах, на проекционных экранах и отпечатках), как правило, манипулируют формой характеристических кривых фотопленок и бумаг, а также трансферными характеристиками цифровых камер (см. гл. 6).

образом, даже вяло-красный помидор смотрится на репродукции куда лучше, чем оранжевый или малиновый. Следовательно, точность передачи цветового тона важнее, чем точность передачи полноты цвета. Более того: вариации полноты цвета естественных цветовых стимулов в целом такие же, как при равномерной добавке белого све-

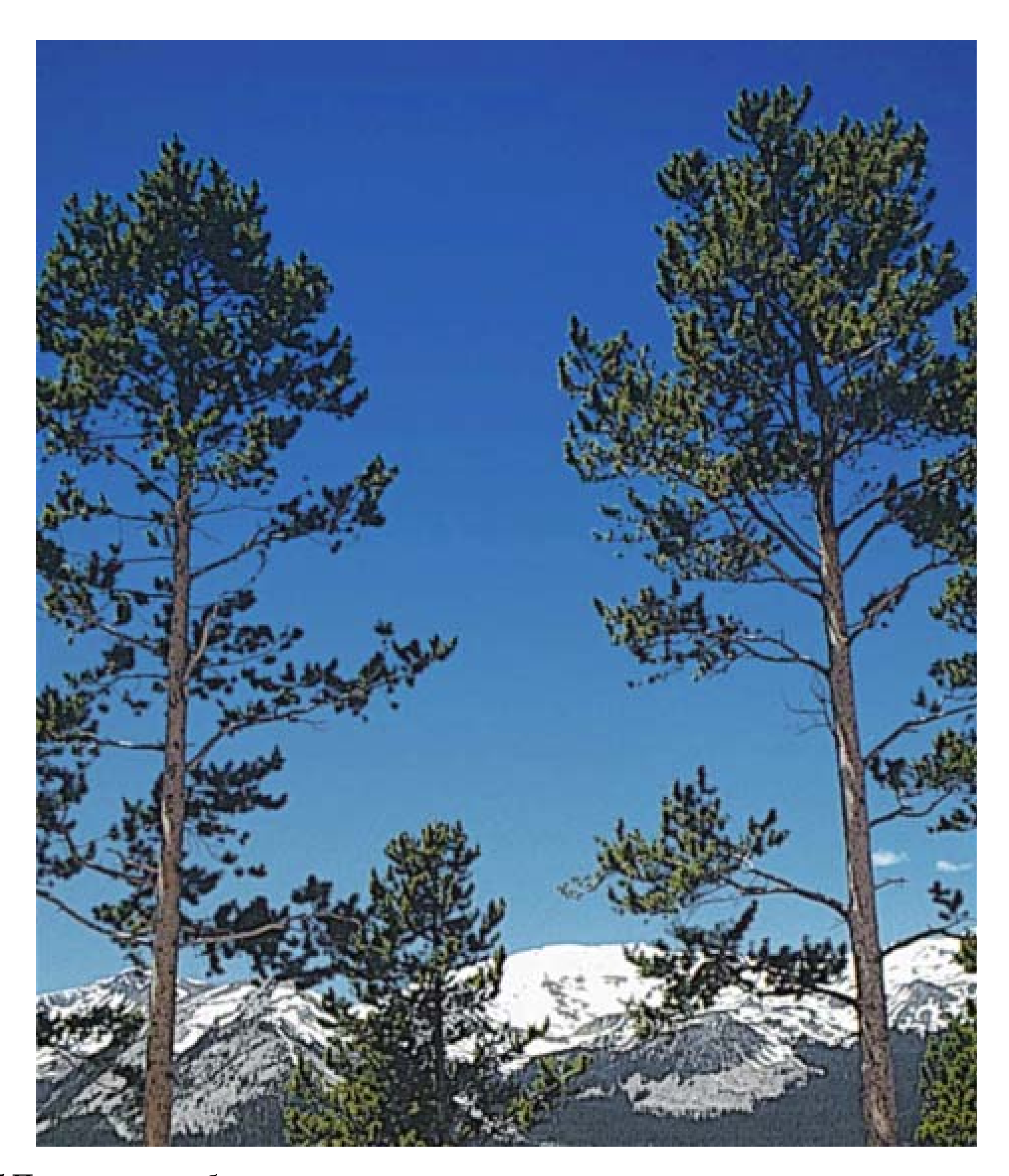


Рис. 5.7 Полнота цвета большинства стимулов весьма изменчива, в результате чего репродукционные допуски по ней весьма велики (см. раздел 5.5). К примеру, синее небо возле горизонта, как правило, имеет низкую полноту цвета, которая начинает расти к зениту (кроме областей возле солнца).

та по всему полю зрения. Следовательно, если все стимулы репродукции пропорционально редуцированы по полноте их цвета, то можно ожидать, что изображение будет выглядеть естественнее, чем когда стимулы редуцированы по полноте их цвета диспропорционально, то есть когда одни стимулы изображения «горят», как монохроматические, а другие почти серые.

5.6.2 Светлота и полнота цвета

Светлота по значимости занимает промежуточное положение между цветовым тоном и полнотой цвета, но значимость субъективной яркости (*абсолютного* уровня светового отклика) в целом равна значимости полноты цвета.

5.6.3 Критерии качества цветовой репродукции

Приведенные выше рассуждения позволяют нам сформулировать критерии качества цветовоспроизведения (в порядке убывания важности):

1. Точность передачи цветового тона.
2. Точность передачи светлоты (тоновый компонент репродукции).
3. Пропорциональность полноты цвета элементов репродукции полноте цвета элементов оригинала.
4. Степень подобия полноты цвета и субъективной яркости элементов репродукции полноте цвета и субъективной яркости элементов оригинала.

5.6.3.1 Точность передачи цветового тона

Значимость первого требования иллюстрирует жесткий приоритет общего хроматического баланса. К примеру, если некое изображение выглядит неприемлемо из-за избытка пурпура — это значит, что цветовой тон его светлых околонейтральных элементов имеет паразитный пурпурный сдвиг. Среди светлых околонейтральных цветов по большинству сцен критичен цвет кожи европеоида, и этот цвет, в частности, является отправной точкой хроматического баланса ряда фото- и киносистем: если сбалансировать их работу по цвету кожи, то в системах с низким хроматическим охватом серые тона окажутся слегка смещенными в желтизну, в системах с высоким охватом — в синеву.

5.6.3.2 Точность передачи светлоты

Выполнение второго требования обычно влияет на естественность восприятия репродукции: избыточная контрастность вызывает ощущение безвкусности, «пережаренности», нарочитости; слишком низкая — вызывает ощущение дымки или тумана (подробнее см. гл. 6).

5.6.3.3 Пропорциональность полноты цвета

Третье требование (пропорциональность полноты цвета элементов репродукции полноте цвета элементов оригинала) иногда оказывается критичным в цветной фотографии, в частности при передаче цвета неба: ультрафиолетовая чувствительность большинства фотоматериалов может привести к тому, что небо будет передано с ощутимо большей полнотой цвета, чем прочие объекты оригинала.

5.6.3.4 Принцип подобия

Четвертое требование (подобие полноты цвета и субъективной яркости элементов репродукции полноте цвета и субъективной яркости элементов оригинала), как правило, не имеет принципиального значения, когда оригинальная сцена сильно освещена (например, полуденным ярким солнцем); при низких уровнях освещения (например, при комнатном освещении) средние и максимальные уровни полноты цвета и субъективной яркости заметно падают.

5.6.4 Выводы

Подытожим сказанное. По фундаментальным и неизбежным причинам простые трихроматические методы не в состоянии обеспечить колориметрически точное воспроизведение цветовых стимулов, о чем красноречиво свидетельствуют результаты

физических измерений. Однако когда цвет объекта и цвет его изображения оценивает *наблюдатель*, результат репродуцирования чаще всего оказывается вполне приемлемым (и в первую очередь тогда, когда цвет объекта попадает в диапазон «повседневных» цветов): практически все повседневные цветовые стимулы варьируют в широком диапазоне цветовых тонов, светлот и уровней полноты цвета.

Последнее означает, что в нашей памяти нет и не может быть высокоточного цветового стереотипа. В частности, как уже было сказано, в реальных сценах вариации стимулов по полноте цвета так велики, что неизбежное снижение полноты цвета всеми цветовоспроизводящими процессами оказывается не столь заметным. Более того, физиологические и психологические эффекты чрезвычайно затрудняют точное сравнение цветовых ощущений, вызванных оригиналом и репродукцией. Следовательно, по общеграфическим работам цветорепродукционные допуски весьма велики.

Однако существует ряд объектов, точность цветопередачи которых критична, так, например, репродукционные допуски на передачу цвета человеческой кожи (см. рис. 5.8) и большинства пищевых продуктов много ниже средних: производитель часто заинтересован в том, чтобы его продукция и упаковка были выполнены без каких-либо визуально заметных ошибок цветовоспроизведения, и в этих случаях требуются жесткие стандарты точности последнего.

5.7 ХРОМАТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ИЗОБРАЖЕНИЙ

Из сказанного выше ясно, что получение визуально приемлемых результатов не требует колориметрически точного цветовоспроизведения. Некоторые исследователи говорят даже о том, что оптимум воспроизведения некоторых памятных цветов (например, кожи) достигается тогда, когда имеет место некоторая разница между цветом оригинала и репродукции (McAdam, 1951; Bartleson и Bray, 1962).

Одной из особенностей восприятия оригинальных сцен является их общий хроматический баланс, который всегда удивительно постоянен (Evans, 1943). Отчасти это постоянство объяснимо физиологической адаптацией зрения к превалирующему освещению, но, как уже было сказано выше, эффект адаптации обычно неполон; постоянство хроматического баланса в том числе объясняется способностью наблюдателей подсознательно (когнитивно) обесцвечивать осветитель, когда они рассматривают объекты при том или ином конкретном освещении: данный физиологический эффект проявляет себя практически мгновенно, тогда как полная физиологическая адаптация может потребовать нескольких минут.

Таким образом, можно было бы говорить, что постоянство хроматического баланса оригинальной сцены автоматически переходит и на ее репродукцию, но, к сожалению, это не так. Одна из причин состоит в том, что цветовая репродукция — это не более чем малая часть поля зрения наблюдателя, что снижает эффективность физиологических и психологических регуляторов. Кроме того, оба вида регуляторов в целом равноэффективны в отношении всех областей и всех тонов оригинальной сцены, но репродукция может иметь отклонения, рознящие ее со сценой по геометрической и тональной позициям.

Следовательно, предотвращение локального хроматического разбаланса в изображении — основа доброкачественного цветовоспроизведения. Сказанное означает, что, к примеру, эмульсии цветных фотоматериалов должны быть политы и обработаны очень равномерно, цветные телекамеры и телеприемники должны быть полностью ли-

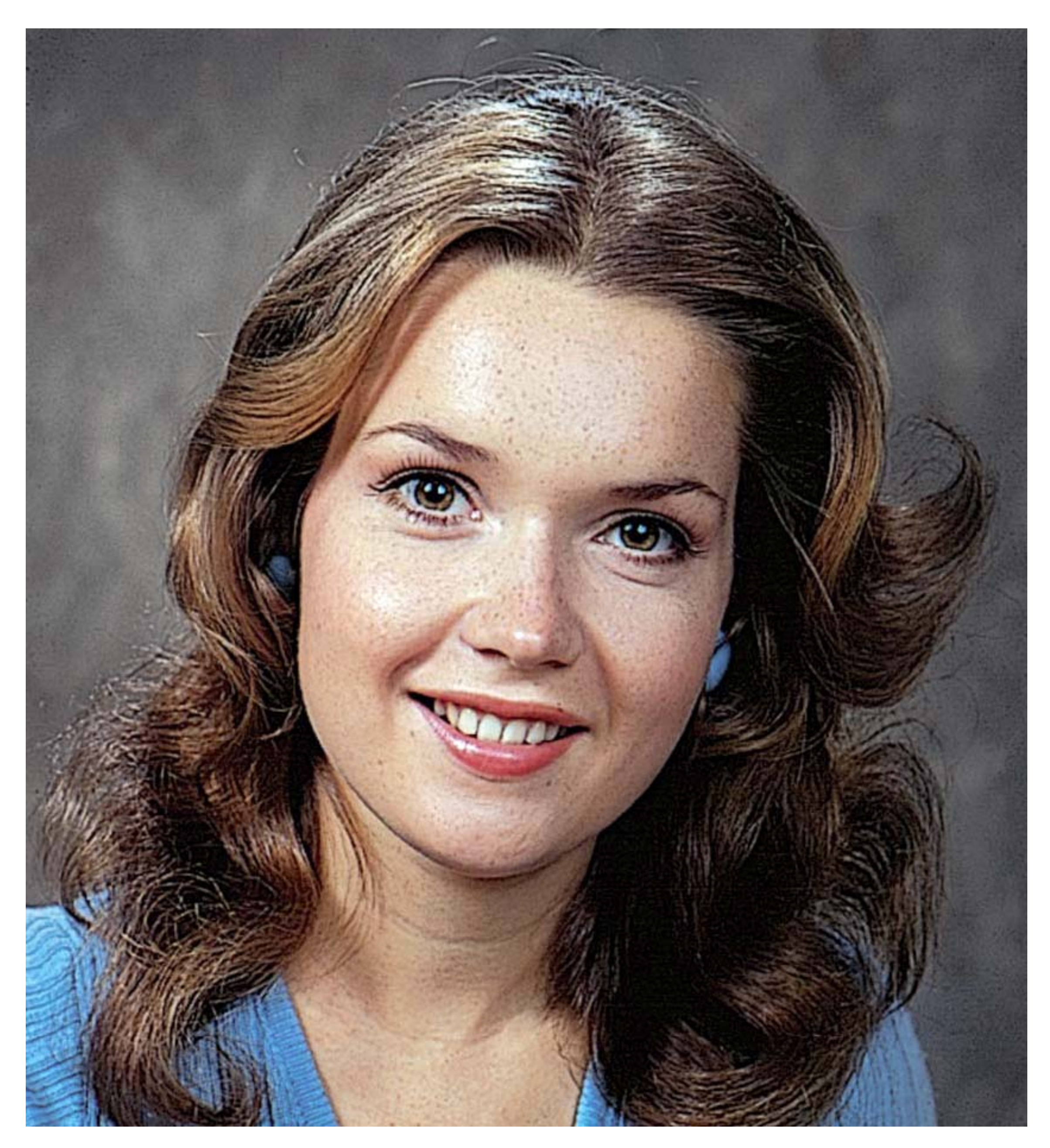


Рис. 5.8 Высококачественная передача цветов человеческой кожи требует тщательного контроля цветового тона. Несмотря на то что некоторые типы кожи при загаре становятся желтоватыми, а свободные от загара участки тела остаются розоватыми, очень важны тонкие изменения цветового тона от участка к участку, поэтому допуски на отклонения в передаче цветового тона кожи очень малы. То же касается зеленого и пурпурного направлений (см. раздел 5.6).

шены локальных отклонений от стандарта, а полутоновые репродукции должны быть равномерно отпечатаны по всему полю.

Постоянство хроматического баланса на всех тоновых уровнях от черного до белого столь же важно и требует прямого управления характеристиками относительных откликов по красному, зеленому и синему «каналам» цветорепродукционной системы.

Когда стабильность воспроизведения достигнута по всем областям и тоновым уров-

ням, правильный хроматический баланс становится возможным, но не обязательно автоматическим.

Давайте проиллюстрируем сказанное на примере работы слайд-проекционной системы с лампой накаливания: система предназначена для проектирования в темной комнате и сбалансирована так, что серые тона воспринимаются совершенно нейтральными, без какого-либо сдвига по цветовому тону.

Общая схема процесса показана на рис. 5.9: в левой верхней части дана нейтрально-серая шкала, освещенная лампами накаливания, которые, как известно, желтят. В результате на сетчатку глаза воздействуют желтые стимулы. Однако же превалирующее освещение также желтит, и, следовательно, чувствительность зрения к желтому оказывается относительно пониженной, что компенсирует желтоватость стимулов, вызывая в сознании серое цветовое ощущение. Следовательно, от репродукции также требуется, чтобы она вызывала в сознании серое цветовое ощущение, но при проекционном показе в темной комнате на сетчатку глаза воздействует только свет от экрана (лампа накаливания), который занимает лишь часть поля зрения, а значит, полной адаптации к свету лампы не происходит. Таким образом, чтобы компенсировать желтизну, серая шкала должна быть воспроизведена на слайде слегка синеватой.

Теперь рассмотрим нижнюю половину рисунка, на котором серая шкала освещена дневным светом. Дневной свет синеват, однако сетчатка глаза хоть и получает синеватые стимулы, но понижает свою чувствительность к световой энергии коротковолновой части видимого диапазона, в результате чего в сознании вновь возникает нейтрально-серое цветовое ощущение. При этом проекционные условия не меняются, и, следовательно, серая шкала вновь должна быть воспроизведена на слайде слегка синеватой.

Из сказанного ясно, что когда фотографирование ведется при свете ламп накаливания, желтый свет этих ламп должен выдавать на пленке слегка синеватый результат, но и при съемке на дневному свету — результат вновь должен быть таким же, то есть — слегка синеватым.

Таким образом, в разных ситуациях должны использоваться разные пленки:

— при свете ламп накаливания должна использоваться специальная пленка с усиленным синечувствительным слоем;

— при дневном свете — пленка с ослабленным синечувствительным слоем.[1]

Пленки, сбалансированные по дневному свету, называются «*пленками дневного света»;* сбалансированные по свету ламп накаливания с цветовой температурой[2] от 3400 до 3500 К — *Тип «A»;* по свету ламп накаливания с цветовой температурой от 3100 до 3200 К — *Тип «B»* (или просто «*Tungsten»)*; исключительно по свету фотовспышек — *Тип «F»* (сегодня устаревший); и последний — *Тип «G»* — рассчитан на некий компромисс между дневным и накальным освещением с 3200 К, то есть на смешанное освещение. С целью компенсации нежелательных эффектов от такого смешения в пленках последнего типа спектральная чувствительность «красного» слоя сдвинута в «зеленую» сторону.

В негативно-позитивных фотосистемах определенная компенсацию цвета осветителя можно выполнить на стадии печати.

В цветном телевидении и электронно-цифровых системах визуализации также

---

1 Или же, альтернативно, должны использоваться специальные конверсионные фильтры, устанавливаемые перед объективом камеры.

2 Цветовая температура обсуждается в разделе 10.2.

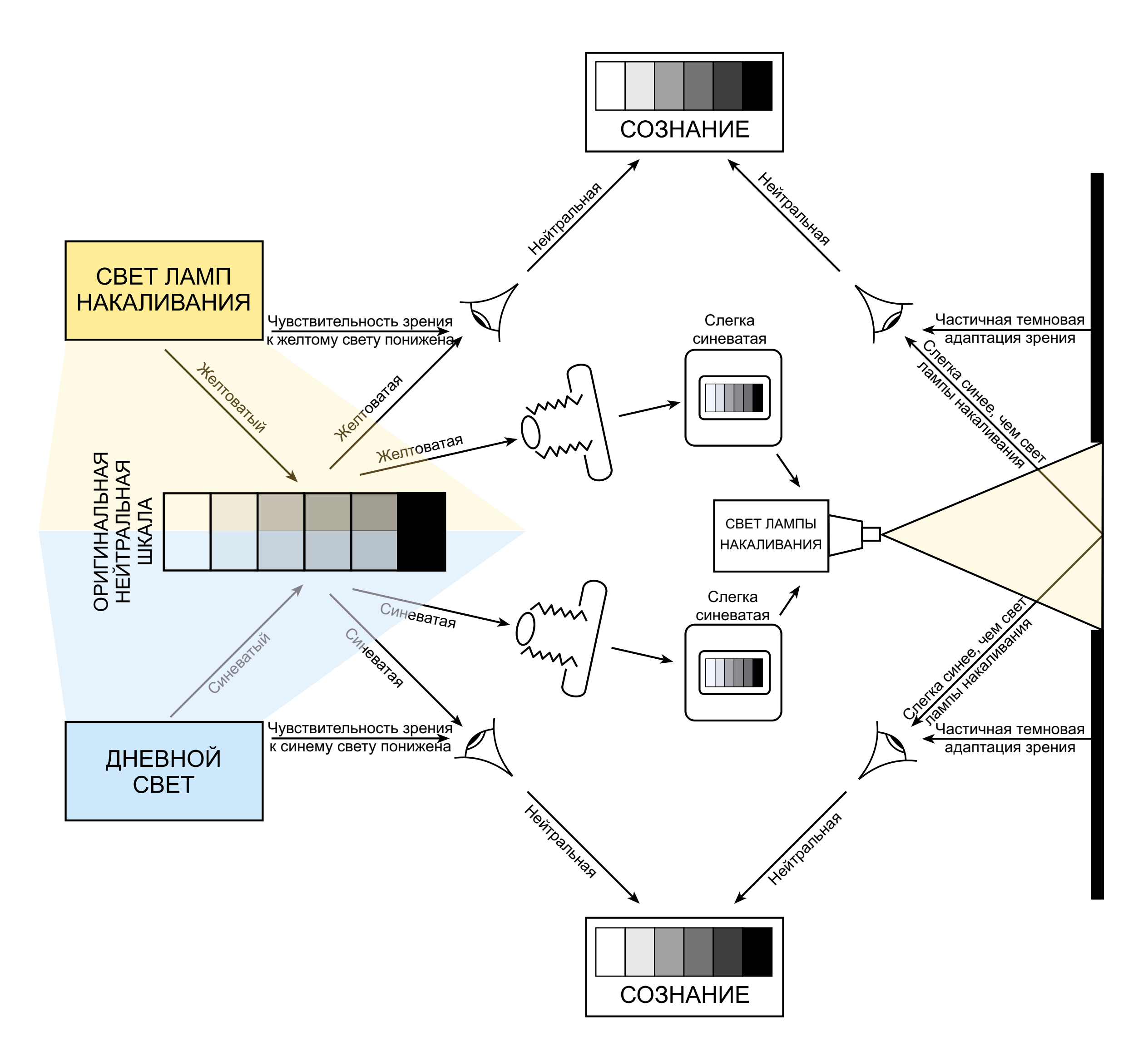


Рис. 5.9 Влияние хроматической адаптации на тактику цветовоспроизведения.

должна выполняться аналогичная компенсация цвета освещения, что осуществимо за счет регулировки «красного», «зеленого» и «синего» сигналов телекамеры, которые всегда должны быть равновеликими по белым (и серым) объектам сцены.

Если два осветителя, явно отличные друг от друга по цвету (как, к примеру, дневной свет и свет ламп накаливания), смешивают свой свет в данной сцене, результат цветовоспроизведения чаще всего оказывается недоброкачественным, и, следовательно, смешанного освещения нужно всячески избегать. Восприятие же самоей оригинальной сцены при двух осветителях часто весьма удовлетворительно, поскольку оба источника освещения, как правило, видны и происходит подсознательная нивелировка их хроматического влияния, в то время как при просмотре изображения источники обычно находятся вне поля зрения.

Некоторые цветовоспроизводящие системы имеют бóльшие, чем зрение, ультрафиолетовые и инфракрасные чувствительности, поэтому может так случиться, что на

изображении разница в цвете между двумя осветителями окажется усиленной относительно прочих цветовых отличий в сцене.

5.8 БАЛАНС СЕРОГО

Правильный хроматический баланс особо необходим при печати на отражение, поскольку окружение отпечатков задает т.н. *эталонный баланс сравнения*. Поэтому успешное воспроизведение изображений на отражающих носителях обычно требует применения специальных методов регулировки их хроматического баланса, наиболее эффективным из которых является метод «баланса по серому», впервые предложенный Ральфом Эвансом (Evans, 1951).

Эванс утверждал, что поскольку любая цветовая репродукция немедленно адаптирует зрение по своему общему хроматическому балансу, то хорошо, если свет, отраженный от отпечатка, создает интегральный стимул, вызывающий серое цветовое ощущение. Поэтому, в частности, слои позитивных фотоматериалов, предназначенных к печати с цветных негативов, часто сенсибилизируют обратно пропорционально коэффициентам пропускания негативов по «красной», «зеленой» и «синей» зонам спектра. Таким образом, отпечатки, примерно «сбалансированные по серому», можно очень быстро получить с помощью методов автоматической цветовой приладки печати, отвечая при этом самым высоким требованиям качества, а усилий по цветокоррекции изображения из-за наличия в нем необычных предметов потребуется на удивление мало.

Метод Эванса, который в печати реализуется по-разному (Bartleson и Huboi, 1956; Hunt, 1960), мы подробно рассмотрим в 16-й главе. Отметим также, что изобретены способы автоматического управления хроматическим балансом и в телекамерах (Pearson и Ray, 1978).

5.9 ВОСПРИЯТИЕ ГЛУБИНЫ ПРОСТРАНСТВА

Синхронная работа пары глаз обеспечивает т.н. *стереоскопическое зрение* или *восприятие глубины пространства*. При решении некоторых задач (например, при вдевании нитки в иголку или навертывании гайки на болт) способность воспринимать глубину пространства оказывается весьма кстати. Однако подавляющее большинство объектов сцен — это предметы, отстоящие от нас на метр и более, и поэтому вклад стереоскопического зрения в их восприятие весьма скромен (а свыше пяти метров вовсе не влияет на него).

При рассматривании изображения сцены ощущение глубины пространства возникает за счет ключевых позиций этого изображения, таких как тени, перспектива, затенение одних объектов другими, относительный размер объектов и параллакс — характер всего перечисленного изначально моноскопичен. Сказанное иллюстрируется тем фактом, что ощущение глубины при рассматривании обычного моноскопического изображения — это плод работы мозга, сильно зависящий от направления падающего света. Свет на репродукции падает, как правило, от верха изображения, и если последнее перевернуть на 180°, то могут измениться все направления в ощущении глубины. Однако данное правило может не сработать в отношении тех областей изображения, что похожи на лицо человека: гипсовый отпечаток человеческого лица, даже освещенный сверху, имеет направление глубины, обратное реальности (то есть как будто бы лицо освещено снизу), но воспринимается при этом именно как лицо, но не как его отпечаток.



Рис. 5.10 Бинокулярное зрение особенно ценно в обеспечении трехмерного восприяти объектов, лежащих ближе одного метра; на больших дистанциях ощущение материальности предметов и глубины пространства достигается за счет размера, перспективы и световых эффектов (как в данном примере). Поскольку в большинстве репродукций изображены объекты, более чем на метр отстоящие от камеры, стереоскопические изображения, полученные двумя камерами и рассматриваемые одновременно раздельно правым и левым глазами, используются крайне редко (см. раздел 5.9).

Вполне реалистичная передача глубины пространства большинством обычных моноскопических изображений (рис. 5.10) лишает смысла создание цветных стереоскопических изображений — оно технологически неудобно и дорого: каждое стереоскопическое изображение требует фиксации двух разных изображений, а также применения специального просмотрового оборудования.

Статические стереоскопические снимки (в отличие от стереокино) в большей степени страдают от недостатка движения, чем статические моноскопические изображения: статические стереоскопические изображения, если угодно, «замораживают» реальность, превращая ее в набор «изваяний», воспринимаемых странно и нереально. По описанным причинам стереоскопические изображения не прижились.

Визуализацию трехмерных объектов, текстур и графиков можно использовать в автоматизированном проектировании (computer-aided design — CAD). Один из путей — скоростной поочередный показ изображений от левого и правого глаза с просмотром их через специальные очки, содержащие жидкокристаллические фильтры. Последние синхронизированы так, что каждое изображение предъявляется только «своему» глазу. Показ ведется с частотой 60 кадров в секунду, чего вполне достаточно

при данной задаче. Если изображения созданы компьютером, то специальная программа может заставить их вращаться, усилив тем самым ощущение глубины пространства.

Наконец отметим, что для разного рода тренингов и развлечений были изобретены специальные шлемы, создающие т.н. виртуальную реальность, в которых видеоизображения, предъявляемые правому и левому глазу, вызывают стереоскопический эффект, а в сочетании с раздельной звуковой стимуляцией правого и левого уха — создают эффект полного присутствия.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Bartleson, C.J., Phot. Sci. Eng., 3, 114 (1959).
Bartleson, C.J., J. Opt. Soc. Amer., 50, 73 (1960).
Bartleson, C.J., Phot. Sci. Eng., 9, 174 and 179 (1965).
Bartleson, C.J., and Bray, C.P., Phot. Sci. Eng., 6, 19 (1962).
Bartleson, C.J., and Huboi, R.W., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 65, 205 (1956).
Evans, R.M., J. Opt. Soc. Amer., 33, 579 (1943).
Evans, R.M., U.S. Patent 2,571,697. British Patent 660,099 (1951).
Hunt, R.W.G., J. Phot. Sci., 8, 186 and 212 (1960).
MacAdam, D.L., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 56, 502 (1931).
Reed, P., Alpine Garden Society Bulletin, p. 143 (June, 1965).
Pearson, D.E., and Ray, A.K., Color. Res. Appl., 3, 117 (1978).

ЛИТЕРАТУРА

Evans, R.M., Eye, Film, and Camera in Color Photography, Wiley: New York (1959).

6 ТОНОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

6.1 ВВЕДЕНИЕ

В ряде случаев желательно, чтобы восприятие изображения сильно отличалось от восприятия сцены, к примеру: удобнее изобразить ночную сцену, сняв ее при обычном освещении, но напечатать фотографию так, чтобы создалось впечатление, будто сцена зафиксирована ночью, то есть при низком уровне освещенности. В основном, однако, цветовоспроизводящие системы используются с целью создания изображений, воспринимаемых приблизительно так же, как и оригинальные сцены. Задача данной главы — разобраться в том, какими должны быть тоновые характеристики цветовоспроизводящих систем, чтобы на выходе устойчиво получать требуемый результат (Hunt, 1969).

6.2 РАВЕНСТВО УСЛОВИЙ ПРОСМОТРА

Когда изображение сцены рассматривается непосредственно в этой же сцене, исходят из того, что фотометрические яркости элементов этого изображения должны быть примерно теми же, что и фотометрические яркости объектов сцены. Проще говоря, серая шкала, помещенная в сцену, должна быть воспроизведена на изображении с теми же яркостями полей.

Масштабные исследования Бартлесона и Бренемана по шкалированию субъективной яркости элементов изображений показали, что вышеприведенный тезис верен (Bartleson и Breneman, 1967; Bartleson, 1975), и, следовательно, при равенстве условий просмотра сцены и ее изображения тоновоспроизводящая система должна быть «идеальной» (см. рис. 6.1), а именно: отношения между логарифмом[1] фотометрической яркости элементов репродукции и логарифмом яркости объектов сцены должны быть строго линейными с наклоном прямой в 45°.

На рис. 6.1 логарифмы воспроизводимых яркостей объектов сцены расположены сверху вниз, дабы быть совместимыми с прочими рисунками, в которых оптические плотности элементов изображения рассчитаны по уравнению:

$$\lg(100 / T),$$

где T — нейтральный коэффициент пропускания (или отражения), выраженный в процентах и всегда вычерчиваемый снизу вверх.

6.3 ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ

В деле цветовоспроизведения весьма полезны графики, в которых логарифм фотометрических яркостей элементов изображения дается как функция от логарифма яркостей объектов оригинальной сцены. Поскольку в первом случае широко исполь-

---

[1] Здесь и далее термин «логарифм» подразумевает десятичный логарифм. — *Прим. пер.*

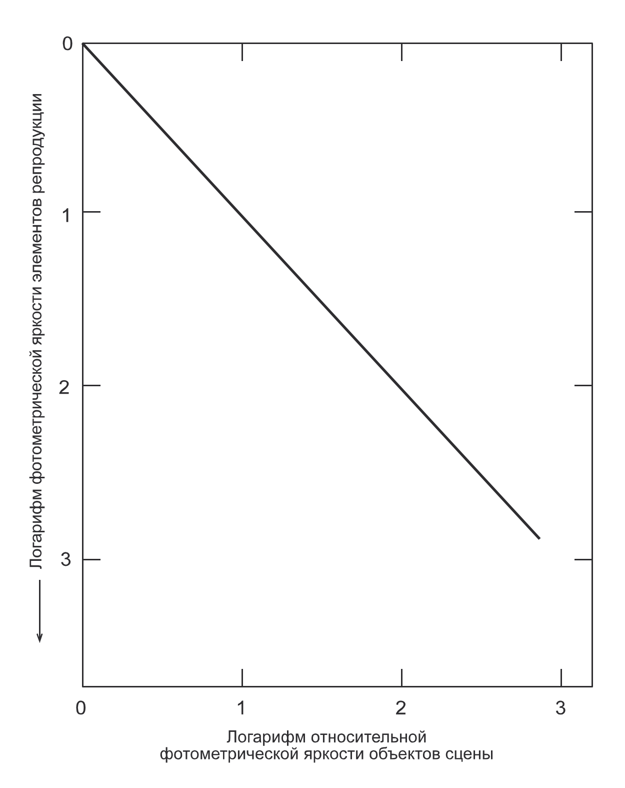


Рис. 6.1 Требуемое отношение яркостей объектов оригинальной сцены к яркостям элементов репродукции при идентичных условиях просмотра того и другого.

зуется такой показатель, как оптическая плотность, а во втором — логарифм экспозиции, такие графики часто называют D-lgH-кривыми или *характеристическими кривыми* цветовоспроизводящей системы (в контексте текущего разговора — тоновоспроизводящей).

Срединный участок характеристических кривых большинства систем обычно более или менее прямой, а концевые участки слегка искривлены (см. кривую «Фактическая система» на рис. 6.7). Участок низких плотностей на таких кривых часто называют «подошвой», а участок высоких плотностей — «плечом».

Тангенс угла наклона (градиент) прямого участка именуется «*гаммой*»[1]. Гамма, равная 1.0, свидетельствует о наклоне под углом 45°, гамма 2.0 — о наклоне в 64° и гамма 0.5 — о наклоне в 27°. Плюс к тому наклон кривой удобно оценивать по ее отдельным точкам (в таком случае говорят о «точечной гамма», но в нашей книге термин «гамма» будет использоваться в общем смысле, включая в себя как общую гамма, так и точечную).

6.4 РАЗЛИЧИЯ В УРОВНЯХ ЯРКОСТИ

Если условия просмотра изображения и оригинальной сцены отличаются лишь общим уровнем освещения — данные Бартлесона и Бренемана (рис. 6.1) должны быть заменены графиком, показанным на рис. 6.2: мы видим, что прямая линия, идущая

[1] Если перейти от логарифмических осей к линейным осям, то прямая линия с определенным наклоном превратится в гиперболическую кривую степенной функции, а величина гамма явится степенью этой функции. — *Прим. пер.*

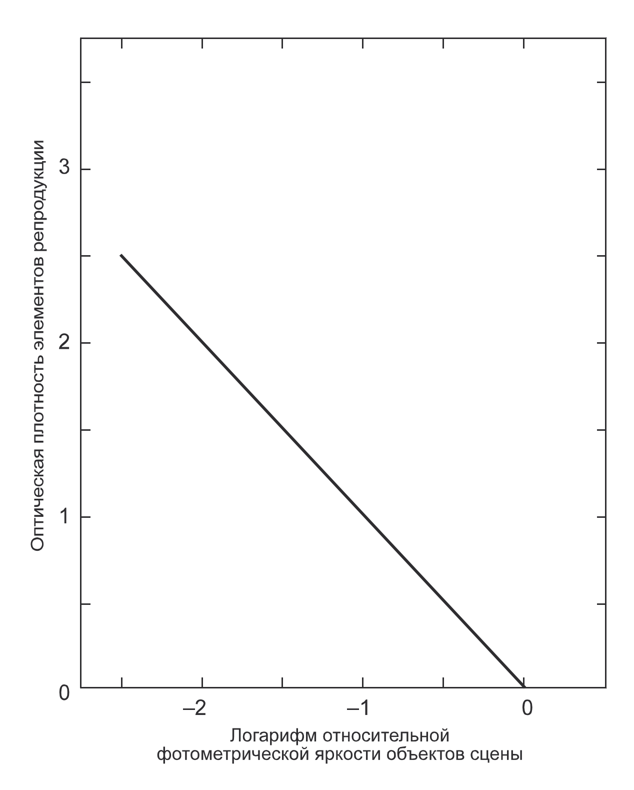


Рис. 6.2 Требуемое отношение фотометрических яркостей объектов оригинальной сцены (взятых относительно фотометрической яркости белого эталона) к оптическим плотностям элементов репродукции, в ситуации, когда условия просмотра отличаются только по уровню яркости.

под углом 45°, держит прежние отношения, но вместо абсолютных использованы относительные яркости, то есть по оси абсцисс вместо логарифма абсолютных яркостей объектов сцены отложен логарифм их яркостей, взятых по отношению к яркости некоего белого эталона (т.н. относительные яркости), а по оси ординат вместо логарифма яркостей элементов репродукции — их оптические плотности. Отметим, что измерение яркостей сцены относительно белого требует четкого определения белого эталона (см. рис. 6.6).

Визуальный смысл рис. 6.2 состоит в том, что зрение распознает объекты не по абсолютным, а по относительным субъективным яркостям (то есть светлотам). И как субъективные яркости соотносятся с логарифмом абсолютных яркостей, так и светлоты соотносятся с логарифмом яркостей *относительных*. Кстати сказать, светлота в том числе характеризует *белизну*, о которой начинают говорить, когда фотометрическая яркость объекта как минимум в пять раз превышает среднюю яркость сцены, и независимо от того, какова абсолютная величина этого среднего значения (она может лежать в очень широком диапазоне величин).

Фактически коэффициент «5» действительно относится именно к среднему уровню яркости, поскольку *визуальная контрастность* (apparent contrast[1]) данной сцены

---

[1] В английском языке слово «contrast» может означать как собственно контраст (логарифм отношения фотометрической яркости белой точки изображения к яркости черной точки), так и контрастность (тангенс угла наклона касательной к характеристической кривой изображения в той или иной точке), поэтому здесь и далее дается контекстный перевод. — *Прим. пер.*

(или ее изображения) растет по мере роста уровня освещения весьма незначительно. Следовательно, когда сцена, освещенная ярким солнцем (примерно 50000 лк), репродуцируется в расчете на рассматривание при 1000 лк освещенности, иллюзию яркого солнечного света можно усилить путем повышения величины гамма изображения; с другой стороны, сцена, освещенная лунным светом (0.01 лк) и репродуцированная в расчете на рассматривание при тех же 1000 лк освещенности, потребует снижения величины гамма.

Однако в весьма широком диапазоне яркостей изменение визуальной контрастности крайне незначительно: при переходе от бытовой освещенности в 1000 лк к яркому солнечному свету зрительный отклик таков, что визуальная контрастность увеличивается только на 7% (Hunt, 1965 a), а при переходе от 1000 лк к слабому искусственному свету с освещенностью в 20 лк — снижается на те же 7%. В большинстве случаев этим изменением можно пренебречь. Следовательно, при тоновоспроизведении мы не принимаем во внимание логарифм абсолютных яркостей, а учитываем лишь отношения между логарифмами относительных яркостей объектов оригинала и элементов репродукции. Короче говоря: относительный логарифм яркостей (рис. 6.2), принятый в качестве единиц измерения, — самодостаточен.

На рис. 6.2 шкалы оптических плотностей элементов изображения нормированы на белый. Таким образом, к примеру, если серый объект в сцене отражает только 10% от количества света, отраженного белым эталоном (позиция –1.0 на шкале логарифма относительной яркости сцены), то его оптическая плотность на репродукции будет равна 1.0, а оптическая плотность эталонного белого — нолю.

Ситуации, при которых тоновая репродукция отличается от оригинала лишь по уровню яркости, — это, как правило, печать на отражение с последующим сравнением результата с изображением на экране монитора. Однако у оригинальных сцен обычно нет четких границ, как, скажем, у отпечатков. Вместе с тем часто случается, что средняя яркость области окружения отпечатка подобна средней яркости самого отпечатка. В реальных сценах такая ситуация тоже не редкость: фотографируемый участок сцены по своей средней яркости может оказаться аналогичен окружающим его областям. Таким образом, влияние границ изображения на его восприятие обычно весьма мало, и, следовательно, кривая рис. 6.2 по-прежнему вполне применима.

Коль скоро речь идет о тоновом (не хроматическом) компоненте репродукции, вышеприведенные рассуждения верны и в том случае, если цветности освещения сцены и репродукции различны. О сложностях, возникающих при решении вопросов *цветового* восприятия, см. в гл. 11 и 31.

6.4.1 Паразитные подсветки

Достижение фактической печатной системой тон-передающих характеристик, показанных на рис. 6.2, требует учета т.н. *паразитных подсветок*, которые всегда обладают эффектом понижения визуальной гамма: *паразитная подсветка камеры* и *просмотровая паразитная подсветка* главным образом проявляют себя в тенях, а *паразитная подсветка печати* (с негативов) — в светах.

Влияние паразитной подсветки весьма велико: в обычных помещениях свет, отраженный от поверхностного слоя даже высокоглянцевых отпечатков, вызывает серьезное снижение гамма на оптических плотностях от 1.6D и ниже (Hunt, 1995a; Carnahan, 1955).

Чтобы при типичных уровнях яркости и наличии всех трех видов паразитной под-



Рис. 6.3 Тоновоспроизведение стимулов, образующихся в результате зеркального отражения источника света металлами и прочими глянцевыми поверхностями (а также водой), весьма затруднительно из-за максимального коэффициента яркости этих стимулов. Сказанное в первую очередь касается отпечатков (см. раздел 13.10). Если участок зеркального отражения окружен темной областью, то т.н. симультанный (одновременный) контраст (см. рис. 5.2) может привести к дополнительному и удачному повышению светлоты этого участка (как в данном примере).

светки привести результирующую тон-передающую характеристику фотоматериала к виду, показанному на рис. 6.2, исходная тон-передающая характеристика этого материала (т.е. измеренная без учета паразитной подсветки) должна быть идентична кривой, отмеченной на рис. 6.4 как «Компенсация паразитной подсветки» (Hunt, 1968). На рис. 6.4 линия, идущая под углом 45° («Среднее окружение»), демонстрирует требуемые финальные отношения яркостей объектов оригинала и элементов репродукции в тех случаях, когда средняя яркость окружения примерно равна средней яркости изображения.

Кривая «Компенсация паразитной подсветки» (рис. 6.4) рассчитана исходя из того, что:

— уровень паразитной подсветки в камере составляет 0.4% от яркости белого в сцене (камеры высокого качества);

— уровень паразитной подсветки отпечатков (по результатам тестов) — 9% от уровня яркости белого в сцене, воспроизведенного на негативе с гамма 0.67 (следовательно, область почернения);

— уровень просмотровой паразитной подсветки соответствует 2.7% от нейтрального коэффициента отражения репродукции, имеющей максимальную оптическую

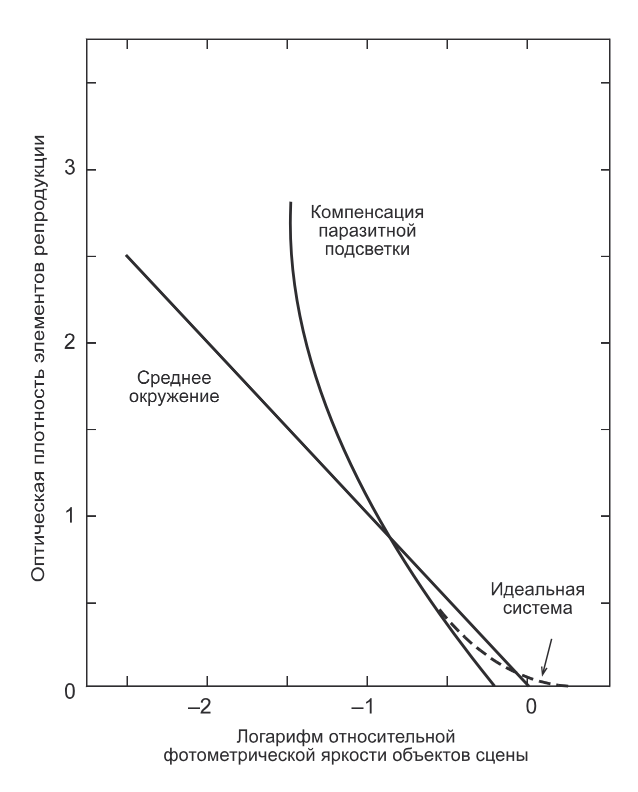


Рис. 6.4 Если в фотографической системе паразитные подсветки камеры, печати и просмотра имеют типичные величины, то чтобы обеспечить такие результирующие отношения оптических плотностей элементов репродукции к фотометрическим яркостям объектов сцены, что показаны на рис. 6.2 (на данном рисунке это кривая «Среднее окружение»), характеристическая кривая этой системы должна иметь вид кривой, отмеченной как «Компенсация паразитной подстветки». Пунктирная кривая «Идеальная система», демонстрирует то, как должна быть понижена гамма тонопередачи на низких оптических плотностях, чтобы обеспечить согласованное воспроизведение предельно высоких светов сцены.[1]

плотность 1.57 (средняя величина при комнатном просмотровом освещении [Hunt, 1965 a] — см. раздел 13.10).

Мы видим, что влияние паразитной подсветки повышает величину требуемой гамма фотографических систем, причем в большей степени по высоким плотностям и в меньшей — по низким (следствием чего является изгиб кривой).

Однако если бы некая система визуализации имела характеристическую кривую, идентичную кривой «Компенсация паразитной подсветки» (рис. 6.4), то любые фрагменты сцены, имеющие бо́льшие яркости, чем яркость эталонного белого (например, зеркальные блики на рис. 6.3), имели бы уровни экспозиции, лежащие справа от точки пересечения кривой с осью абсцисс. Следовательно, несмотря на то, что блики могут оказаться вполне корректно зафиксированными фотокамерой, все они (при любой модуляции) будут воспроизведены на изображении с нулевой плотностью, воспринимаясь при этом как неестественные и некрасивые белые «дыры». Более того, при малейшей экспозиционной передержке мы получим на отпечатках аналогичный эффект по тем участкам сцены, чья яркость даже чуть ниже яркости эталонного белого. По этим причинам идеальная печатающая система на низких оптических плотностях

[1] Согласованное с эффектом адаптации зрения по высоким светам сцены. — *Прим. пер.*

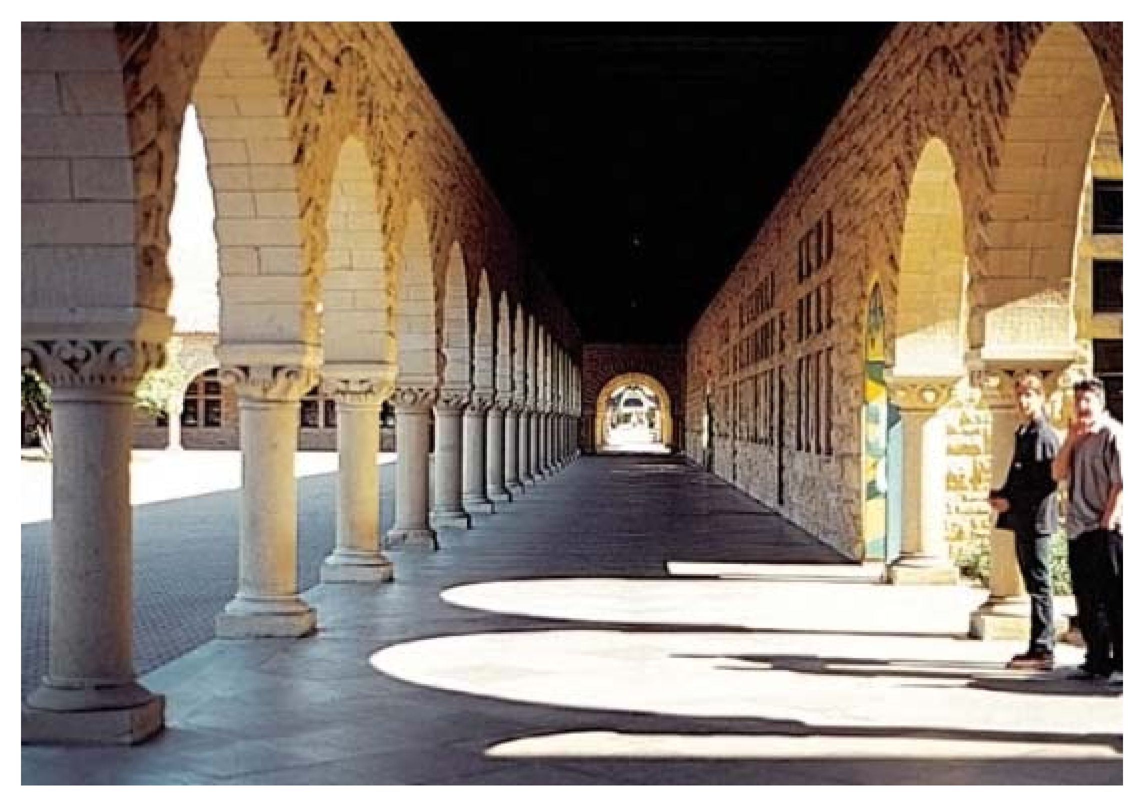


Рис. 6.5 (a)



Рис. 6.5 (b)



Рис. 6.6 Относительные фотометрические яркости отдельных объектов чаще не столь важны, поскольку уровень освещенности последних различен: он зависит от угла освещения, количества теней или расстояния до источника освещения. Однако, коль скоро в сцене может иметь место серьезный разброс по относительным яркостям (см. рис. 6.5 [a] и [b], а также разделы 5.4 и 6.6), общая концепция их тоновоспроизведения весьма важна: пренебрегая ею можно получить либо чрезмерно жесткое изображение, либо наоборот — слишком мягкое, вялое и дымчатое.
Относительные фотометрические яркости элементов изображения лучше всего измерять в сравнении с яркостью белого эталона (см. раздел 6.4), но его выбор непрост, поскольку белый лежит в широком диапазоне яркостей.

должна иметь плавно понижающуюся гамма (кстати, создание фотоматериала с характеристической кривой, резко пересекающей линию нулевых плотностей, в принципе невозможно) — см. пунктирную кривую «Идеальная система» на рис. 6.4.

На рис. 6.7 кривая «Идеальная система» эквивалентна кривой «Компенсация паразитной подсветки» (рис. 6.4), за исключением участка низких плотностей, обозначенного на рис 6.4 пунктирной кривой. Плюс к тому на рис. 6.7 дана кривая «Фактическая система», характеризующая реальную систему цветной печати: мы видим, что линия весьма близка к пунктирной, за исключением низких и высоких плотностей. На низких плотностях она слегка выше из-за вуали фотобумаги, а на высоких — ниже, поскольку такую высокую гамма, как в идеальной системе, получить невозможно.

На рис. 6.8 кривая фактической печатающей системы (взята с рис. 6.7) сравнивается с девятью точками, представляющими оптические плотности элементов изображения и логарифмы относительных яркостей объектов сцены по девяти шагам серой шкалы, сфотографированной на ярком солнечном свету (чтобы обеспечить корректный уровень экспозиции, в кадр был помещен человек). Оптические плотности элементов изображения и логарифмы яркостей объектов сцены были измерены при помо-

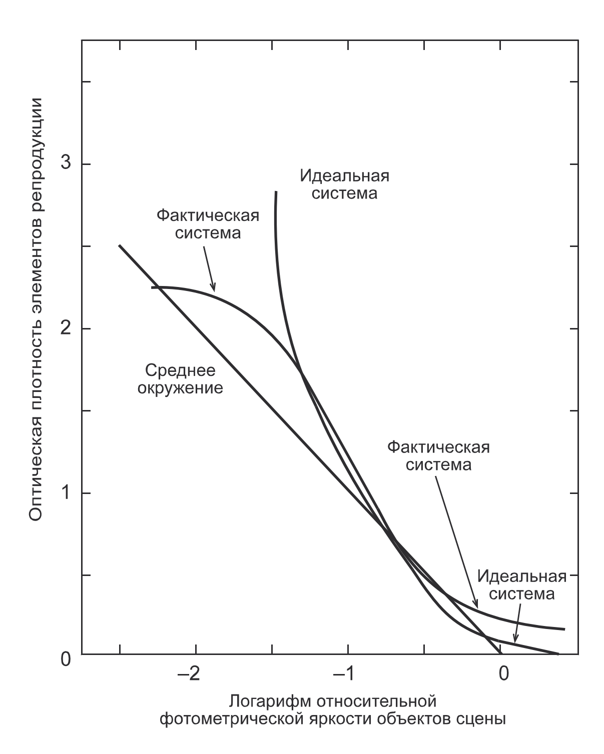


Рис. 6.7 Кривая «Идеальная система» повторяет кривую «Компенсация паразитной подсветки» рис. 6.4 за исключением низких плотностей (дабы обеспечить согласованное воспроизведение предельно высоких светов). Кривая «Фактическая система» — это характеристическая кривая популярных фотолабов.

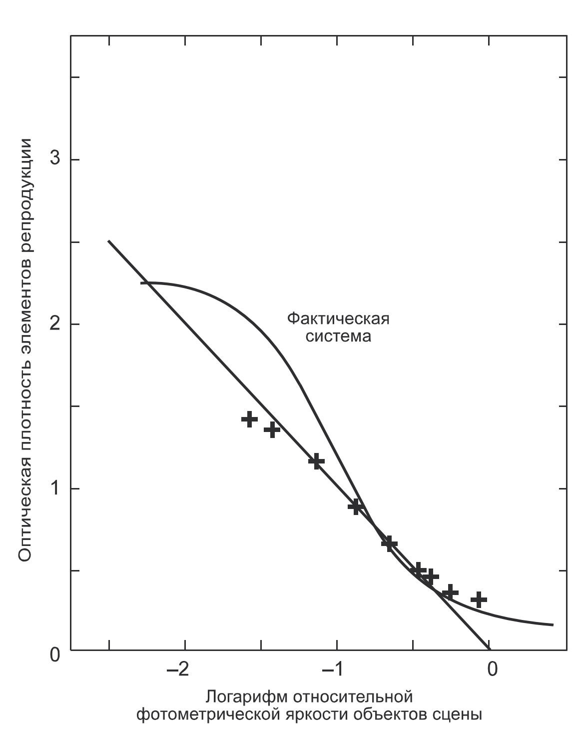


Рис. 6.8 Оптические плотности (при комнатном освещении) изображения девятипольной серой шкалы (отмечены крестиками). Шкала сфотографирована на ярком солнечном свету, воспроизведена системой «пленка — отпечаток» с характеристической кривой, показанной на рис. 6.7 («Фактическая система»).

щи *телефотометра* в типичном помещении и в непосредственной близости от фотокамеры, то есть в обычной наблюдательской позиции (Hunt, Pitt и Ward, 1969). Из рис. 6.8 явствует, что, несмотря на сильный изгиб характеристической кривой фактической фотографической системы (максимальная гамма существенно больше единицы), по большей части диапазона плотностей (и от самого его начала) точки расположены в непосредственной близости к линии единичной гамма.

С целью повышения контрастности и полноцветности систем, ориентированных на «бытовую» печать, гамма часто поднимают примерно на 15% от той, что показана на рис. 6.8. У такой тактики имеются по меньшей мере четыре причины (Hunt, 1999):

1. Просмотр отпечатков, как правило, происходит при уровне освещения много меньшем, чем уровень освещения типичных сцен, что понижает визуальную контрастность изображения (см. рис. 13.7) и полноту цвета его элементов (см. рис. 8.19).

2. Влияние атмосферной дымки в сценах заметно меньше, чем на изображениях (Mahadev и Henry, 1999).

3. Памятные цвета обычно имеют бóльшую полноту цвета, чем фактические цветовые стимулы сцены (Bartleson, 1961; Perez-Carpinell, de Fez, Baldovi и Soriano, 1998).

4. Уменьшение размера отпечатков (при прочих равных) снижает полноту цвета их элементов (Burnham, 1952).

6.5 РАЗЛИЧИЯ В ОКРУЖЕНИЯХ

Коль скоро проекционные изображения мы противопоставляем отражающим, — это значит, что мы говорим о принципиально разных просмотровых ситуациях. Будем ли мы рассматривать листовые слайды на светящемся матовом стекле или займемся проекционным показом слайдов или кинофильмов — средняя яркость окружения будет заметно меньше, чем средняя яркость изображения (кстати, данный эффект усугубляется тем, что большинство изображений рассматривается при малых угловых размерах).

Если речь идет о телевизионном показе изображений или о просмотре листовых слайдов на матовом стекле (полностью покрывающем слайд), то окружением будет являться оставшаяся часть просмотрового помещения. Яркости объектов в комнате обычно ниже, чем яркости элементов изображения, и мы в этом случае говорим о «тусклом окружении».

Если в затемненном помещении ведется проекционный показ слайдов или кино, то, как правило, фотометрическая яркость окружения много меньше средней яркости изображения, и мы в этом случае говорим о «темном окружении».

Влияние тусклого и темного окружений таково, что изображения воспринимаются светлее, чем в ситуации с равной яркостью окружения (см. рис. 5.2). Отметим, что данное высветление в большей степени проявляет себя в темных областях изображения, нежели в светлых (Breneman, 1962; Bartleson и Breneman, 1967).

С целью получения визуально корректной тоновой репродукции при тусклом окружении необходимо поднять результирующую целевую гамма системы примерно до 1.25 (см. рис. 6.9). При темном окружении визуальное осветление теневых областей изображения еще более выражено, и чтобы получить корректную тоновую репродукцию в этом случае потребуется гамма порядка 1.5 (вновь см. рис. 6.9). И только если изображение рассматривается в «среднем окружении», оптимальной будет гамма 1.0, однако ситуация среднего окружения свойственна лишь просмотру отражающих отпечатков (и сравнению их с экранным изображением в ярко освещенном помещении).

Величины 1.25 и 1.5 (соответственно по тусклому и темному окружениям) подходят к относительно высоким оптическим плотностям — при малых плотностях более подойдут значения примерно на 15% меньшие. Однако если яркости элементов изображения много меньше, чем яркости соответствующих объектов сцены (типичная ситуация), — желательно компенсационное повышение гамма примерно на 15% (см. рис. 13.7). Плюс к тому атмосферная дымка сцены, зрительная память и фактический размер изображения — это факторы, ведущие к необходимости повышения величины гамма.

Достижение результирующих величин гамма 1.25 и 1.5 (рис. 6.9) требует, чтобы системы имели бóльшие значения гамма, дабы справиться с влиянием паразитной подсветки камеры и просмотровой паразитной подсветки (а также, если нужно, — подсветки печати).

В случаях проекционного показа слайдов или кинофильмов в темном окружении применяется кривая «Компенсация паразитной подсветки» (см. рис. 6.10), но ее точная форма зависит от величины этой подсветки. Кривая позволяет компенсировать и ранее обсуждавшуюся паразитную подсветку камеры (у камер высокого качества — 0.4% от яркости белого в сцене), но паразитная подсветка печати при этом не учитывается.

Величина паразитной подсветки сильно зависит от проекционных условий: в лучших ситуациях, когда проектируется слайд или фильм с нормальной плотностью, уровень паразитной подсветки равен 0.1% яркости экрана при пустом кадровом окне проектора (Hunt, 1965a; Estes, 1953), однако в заурядных ситуациях ее величина может достигать 0.6% (и это число было использовано при получении кривой рис. 6.10). Очевидно, что в обоих случаях гамма пленки на высоких плотностях должна быть плавно увеличена (что придает кривой изогнутый вид). Если уровень паразитной подсветки выше, чем выбранное значение, кривизна должна быть больше и должна переходить на меньшие плотности. Если в расчет кривой рис. 6.10 включить паразитную подсветку печати, то в случае негативно-позитивных систем гамма будет расти на малых плотностях (см. рис. 6.4), а в случае позитивно-позитивных систем — на высоких (см. раздел 13.3).

Если характеристическая кривая системы визуализации резко пересекает линию нулевых плотностей (рис. 6.10) и при этом яркости объектов сцены превышают яркость эталонного белого, то, как и в случае печати на отражение, на изображениях будут возникать крайне нежелательные «дыры». Следовательно, идеальная характеристическая кривая системы должна понижать гамма в светах плавно (пунктирная кривая «Идеальная система» на рис. 6.10).

На рис. 6.11 кривая «Идеальная система» идентична кривой «Компенсация паразитной подсветки» рис. 6.10, за исключением лишь того, что на низких плотностях она повторяет пунктирную кривую. На том же рисунке дана кривая «Фактическая пленка», характеризующая популярные слайд-пленки, предназначенные к большому проекционному увеличению: мы видим, что кривая повторяет «идеальную» за исключением низких плотностей, где она слегка выше из-за вуали на пленке, и высоких плотностей — где она слегка ниже из-за невозможности получения бесконечно высокой гамма, как у «идеальной» кривой.

На рис. 6.12 дано сравнение характеристической кривой фактической обращаемой фотопленки (взята с рис. 6.11) с девятью точками, представляющими отношение оптических плотностей элементов репродукции к логарифму относительных яркостей объектов сцены (по девяти градациям той же серой шкалы, что использована в рис. 6.8, сфотографированной на ярком солнечном свету; как всегда с целью коррекции экспо-

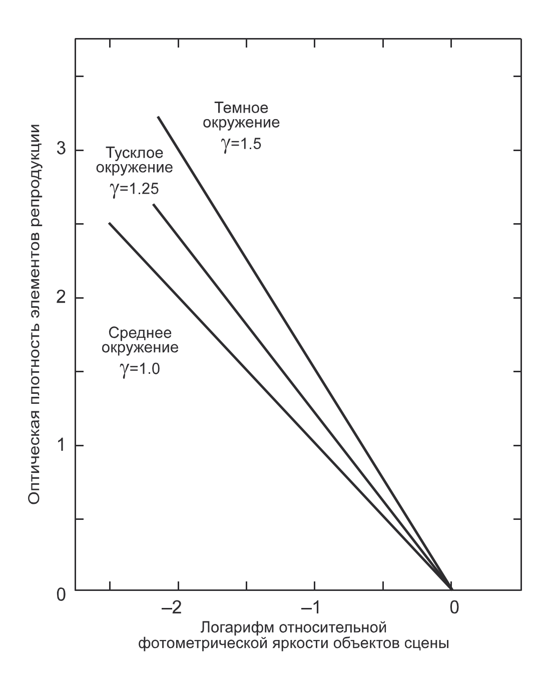


Рис. 6.9 Необходимые отношения яркостей объектов сцены, взятых относительно белого эталона, к оптическим плотностям элементов репродукции при рассматривании последней в среднем окружении (отражающие отпечатки), в тусклом окружении (телепередача или листовые слайды в просмотровой кабине) и в темном окружении (проекционный показ слайдов в темном помещении).

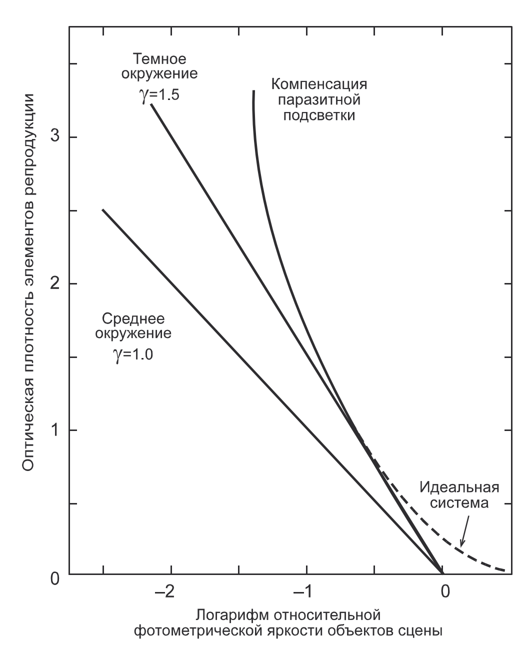


Рис. 6.10 Если в фотографической системе паразитные подсветки камеры и просмотра имеют типичные величины, а сам просмотр ведется в темном окружении, то для обеспечения таких результирующих отношений плотностей элементов репродукции к яркостям объектов сцены, что показаны здесь (прямая «Темное окружение; γ=1.5»), а также на рис. 6.9, — характеристическая функция системы должна иметь вид кривой, отмеченной как «Компенсация паразитной подстветки». Пунктирная кривая «Идеальная система», демонстрирует то, каким образом на низких плотностях должна быть понижена гамма тонопередачи, чтобы обеспечить согласованное воспроизведение предельно высоких светов.

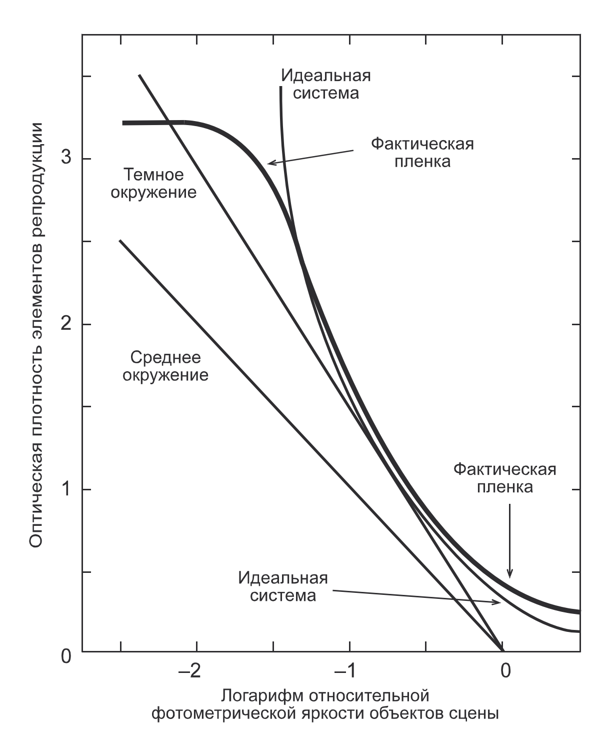


Рис. 6.11 Кривая «Идеальная система» повторяет кривую «Компенсация паразитной подсветки» рис. 6.10 за исключением низких плотностей (дабы обеспечить согласованное воспроизведение предельно высоких светов). Кривая «Фактическая пленка» — это характеристическая кривая популярных обращаемых фотопленок, предназначенных к проекционному показу слайдов.

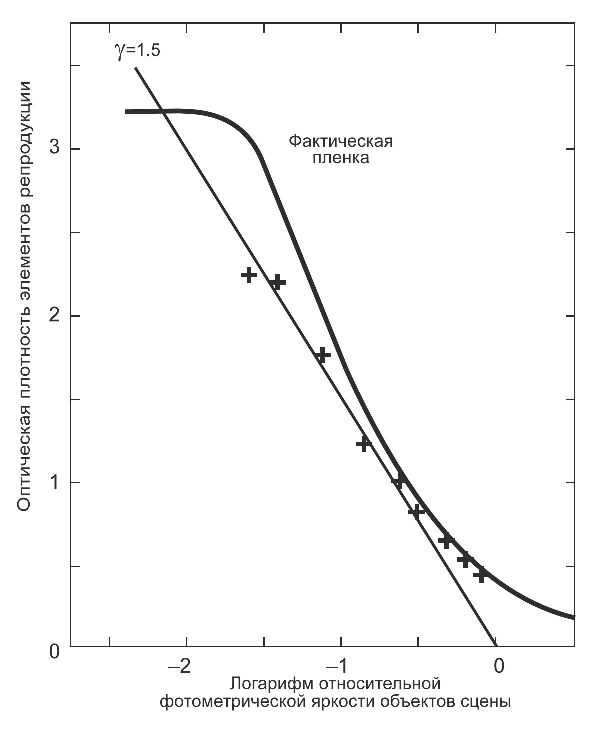


Рис. 6.12 Визуальные оптические плотности при проекционном показе слайд-изображения девятипольной серой шкалы (отмечены крестиками). Шкала сфотографирована при ярком солнечном свете на слайд-пленку с характеристической кривой «Фактическая пленка» (рис. 6.11).

зиции в кадр помещено лицо человека). Оптические плотности полей шкалы на репродукции и яркости полей фактической шкалы в сцене были измерены с помощью телефотометра с обычной наблюдательской позиции в просмотровом помещении, то есть — возле камеры (Hunt, Pitt и Ward, 1969). И вновь мы видим, что несмотря на сильный изгиб характеристической кривой фактической фотографической системы (максимальная гамма много больше 1.5) — практически по всему диапазону плотностей (с учетом своей паразитной подсветки) система дает точки, лежащие возле прямой линии с гамма 1.5. Кроме того, если логарифм относительных яркостей сцены толковать как измерение оптических плотностей сцены, то оптические плотности репродукции будут в 1.5 раза выше по всему динамическому диапазону фотоматериала (отклонения возникают только на плотностях ниже 0.7, где самые высокие света и белые объекты воспроизводятся слишком темными, и выше 2.2, где темно-серые и черные объекты воспроизводятся слишком светлыми).

В случае листовых слайдов, предназначенных к просмотру на специальных столах с подсветкой, тусклое окружение требует, чтобы величина гамма тонопередачи была 1.25. На рис. 6.13 даны оптические плотности девятипольной серой шкалы (квадратные точки), воспроизведенной на листовом слайде и измеренные при помощи телефотометра с типичного наблюдательского расстояния. К сравнению там же приведены данные по отражающим отпечаткам (крестики) и проекционным слайдам (кружки).

6.6 ТОНОПЕРЕДАЧА ОБЪЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Данные рис. 6.13 свидетельствуют о том, что при печати на отражение большинство полей серой шкалы оригинальной сцены воспроизводится с теми же оптическими плотностями, что и в оригинале (гамма = 1.0); в случае листовых слайдов на просвет — с гамма 1.25, а в случае проекционного показа — 1.5. Следует отметить, однако, что величина гамма зависит от того, что именно принято за эталонный белый. Кроме того, серая шкала — это совершенно плоская, искусственная вещь, а реальные объекты обычно объемны, в результате чего их яркости меняются в зависимости от угла освещения (см. рис. 6.5).

Чтобы достичь оптимальной тонопередачи объемных объектов, обеспечения простого равенства оптических плотностей оригинала и репродукции может оказаться недостаточно: для оптимального тоновоспроизведения сцены отпечаток или слайд порой должны либо высветлить, либо затемнить изображения тех или иных объектов. Последнее достигается за счет аккуратной компрессии светов (Evans и Klute, 1944) и, нередко, осветления теней.

6.7 СРАВНЕНИЕ СЛАЙДОВ С ОТПЕЧАТКАМИ

На рис. 6.14 объединены данные рис. 6.8 и 6.12 по серой шкале на пропускание, плотности которой ослаблены в 1.5 раза. Мы видим, что оба набора данных очень близки друг другу, но теневые и световые поля шкалы на слайде воспроизведены с большей гамма. Бóльшая, чем у слайдов, компрессия светов и теней на отпечатках общеизвестна и несколько снижает качество последних (см. гл. 13).

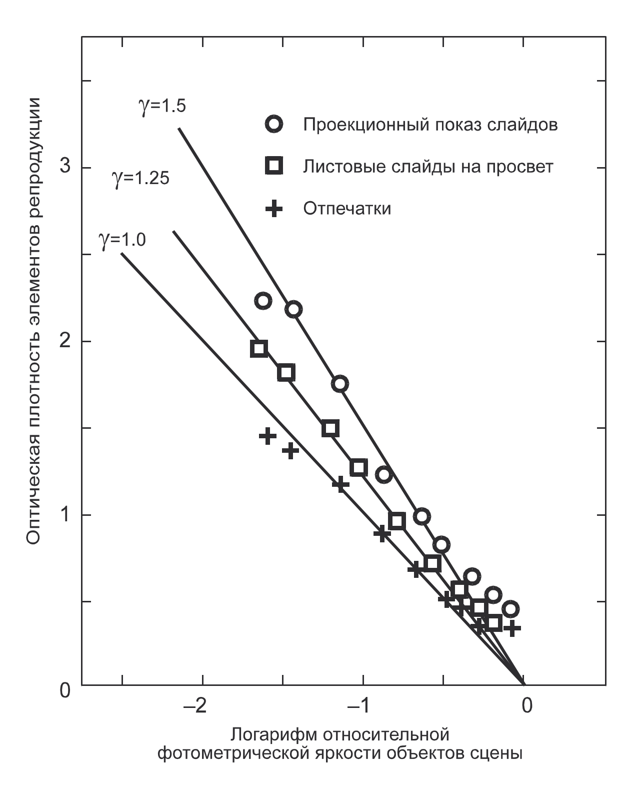


Рис. 6.13 Оптические плотности элементов изображений девятипольной серой шкалы как функция от относительных фотометрических яркостей объектов сцены. Плотности элементов отпечатков укладываются в $\gamma = 1.0$, листовых слайдов — в $\gamma = 1.25$, проекционной системы — в $\gamma = 1.5$.

6.8 ПОЛНОТА ЦВЕТА

Коль скоро полнота цвета элементов изображения растет по мере роста гамма тонопередачи (см. раздел 7.9), то понятно, что при прочих равных проекционные и листовые слайды будут обладать большей полнотой цвета элементов, чем отпечатки (поскольку результирующие гамма проекционных и листовых слайдов равны 1.5 и 1.25 соответственно). Сказанное вполне согласуется с практикой, но отметим, что на результирующую полноту цвета элементов отпечатков оказывает влияние ряд факторов, например межслойный эффект (внутренние отражения между базовым и поверхностным слоями фотоматериала), снижающий эффективность красителей и тем самым еще больше понижающий полноту цвета элементов отпечатка (см. раздел 13.9); плюс к тому мы знаем, что полнота цвета растет по мере роста общего уровня освещения (Hunt, 1952, 1953, 1965b), поэтому отпечатки часто освещают более интенсивным светом, чем проекционные слайды, добиваясь этим некоторого роста полноты цвета элементов отражающей репродукции.

Слайды тоже могут несколько терять полноту цвета своих элементов, из-за темного просмотрового окружения, в частности в тех случаях, когда к краям изображения прилегают большие красочные области (Hunt, 1950; Rowe, 1972; Pitt и Winter, 1974; Bartleson, 1977; Breneman, 1977).

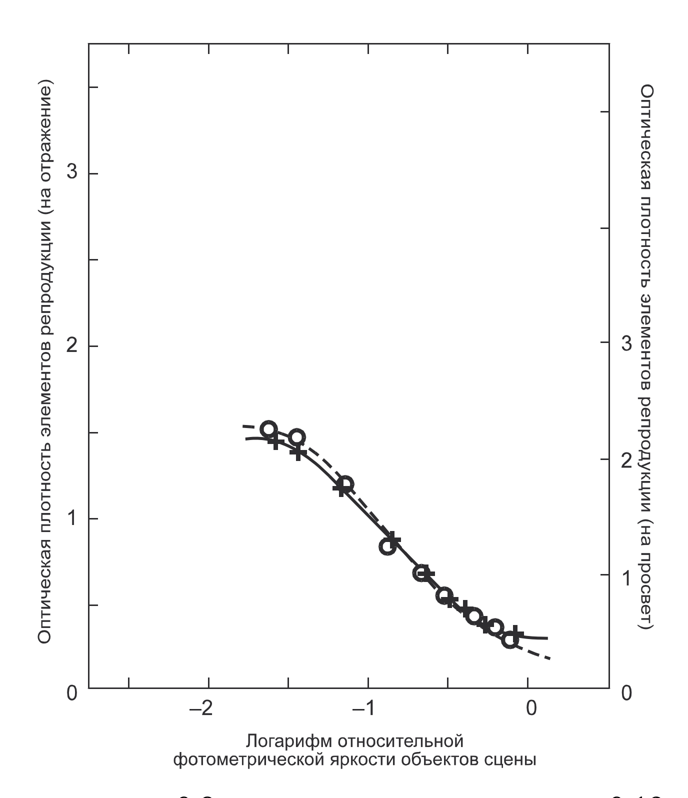


Рис. 6.14 Крестики и кружки рис. 6.8 соответствуют крестикам рис. 6.12, но взяты с серой шкалы, плотности которой ослаблены в 1.5 раза. Если в случае проекционного показа слайдов изменение на шкале плотностей корректно учитывает влияние темного окружения, — соседство крестиков и кружков укажет на сходство тонального баланса проектированных слайдов и отпечатков. Однако у последних гамма в высоких светах и глубоких тенях меньше.

6.9 ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ШИРОТА

Когда паразитная просмотровая подсветка, возникающая при проекционном показе слайдов, имеет постоянную величину, то независимо от общей плотности слайда (зависящей от уровня экспозиции при съемке) его характеристическая кривая будет оставаться в целом постоянной, поскольку, еще раз напомним, паразитная подсветка по большей части — это подсветка просмотра.

При проекционном показе слайдов паразитная просмотровая подсветка является следствием того, что свет экрана, отражаясь от стен комнаты, возвращается назад на экран. Следовательно, по мере роста общей плотности слайда просмотровая паразитная подсветка будет несколько уменьшаться, а эффективная гамма на высоких плотностях — расти. Плюс к тому при недодержке света́ сцены не попадают на «низкогаммовые» участки характеристической кривой слайда, и поэтому недоэкспонированные (темные) слайды в сравнении с нормально экспонированными имеют бо́льшие величины эффективных гамма. У светлых слайдов наоборот — значения эффективной гамма меньше. Таким образом, фотографическая широта слайд-материалов при недоэкспозиции (недодержке) характеризуется избыточной визуальной гамма, а при переэкспозиции (передержке) — недостаточной. И то, и другое подтверждается практикой. Однако при сильной недоэкспозиции слайдов ограниченность максимальной оптической плотности пленки может привести к недостаточной гамма тонопередачи в тенях, а в

случае объединения с избыточной гамма по остальным полям шкалы — дать визуально неприемлемый результат (при этом нельзя забывать, что нежелательно высокая плотность слайдов может оказаться следствием недостаточной яркости проекционной лампы).

Фотографическая широта отпечатков обычно зависит не только от широты регистрирующего материала: в случае кремниевых сенсоров и негативных пленок длинные прямые характеристические кривые (см. раздел 14.15) обычно дают много бóльшую фотографическую широту при съемке, нежели изогнутые кривые слайд-пленок. Однако когда речь идет о печати с негативов, широта экспозиции печати ограничивается: на светлых отпечатках — недостаточной гамма (такова специфика кривой тонопередачи системы на низких плотностях), на темных отпечатках — малым диапазоном плотностей, недостаточным для адекватного отображения средней сцены.

В целом же фотографическая широта ограничивается необходимостью воспроизведения объектов примерно с теми же плотностями, что и в оригинальной сцене, поскольку отпечатки рассматриваются одновременно с естественными объектами поля зрения.

6.10 ТОНОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПРИ ДУПЛИЦИРОВАНИИ

Когда слайд, выполненный на пленке с характеристической кривой «Фактическая пленка» (рис. 6.11), дуплицируется контактным способом на точно такой же пленке, результирующая характеристическая кривая копии будет эквивалентна пунктирной кривой рис. 6.15. Предполагается, что при контактной печати имеет место некоторая незначительная паразитная подсветка (что подтверждается практикой), однако даже паразитная подсветка оптической печати при таком способе контратипирования не в состоянии обеспечить необходимую компенсацию радикального увеличения гамма тонопередачи. Сильное увеличение гамма в данном случае является результатом двойного использования гамма 1.5: первый раз при съемке, второй раз — при копировании. Копии, выполненные такой системой, обладают чрезмерной оптической плотностью («проваленные» тени [block-up shadows]) и недостаточной контрастностью светов («выжженные» света [burn-out highlights]) — рис. 6.16. Подобные эффекты (хоть и менее выраженные) возникают в случае листовых слайдов (см. рис. 6.17).

Ситуацию можно частично исправить с помощью метода т.н. *принудительной подсветки* — сознательной добавки паразитной подсветки печати (Lighton, 1967; Doody, Lawton и Perry, 1978). Однако степень коррекции, достижимая за счет подсветки, ограничивается необходимостью поддержания адекватной максимальной плотности копии.

В идеале по каждой точке тоновой репродукции дубликат должен иметь характеристическую кривую с гамма 1.0 на всех уровнях оптических плотностей, но на практике невозможно уйти от низких величин гамма на «подошве» и «плече» характеристической кривой обычных фотопленок. Поэтому были разработаны специальные контратипные дубль-пленки (типичная характеристическая кривая показана на рис. 6.18), ориентированные на дуплицирование листовых слайдов: мы видим, что специальная контратипная пленка много ближе к идеальной гамма (γ=1), чем обычная пленка; слегка бóльшая гамма (в сравнении с 1) дубль-пленки на высоких плотностях дает некоторую коррекцию паразитной подсветки оптической печати (или увеличения). Если специализированная контратипная пленка с характеристиками, показанными на рис. 6.18, по каким-то причинам нет в наличии, то можно использовать обыч-

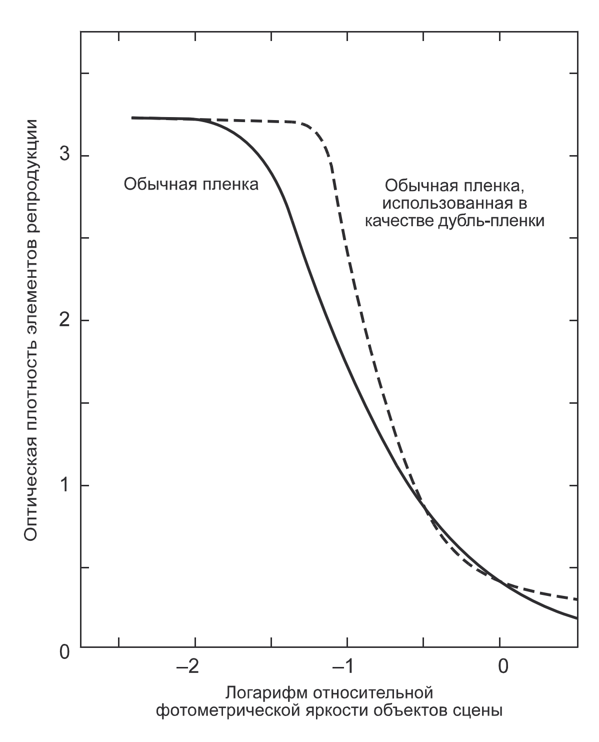


Рис. 6.15 Результирующая характеристическая кривая (пунктирная линия) обычной пленки, использованной в качестве контратипной («Фактическая пленка» на рис. 6.11).

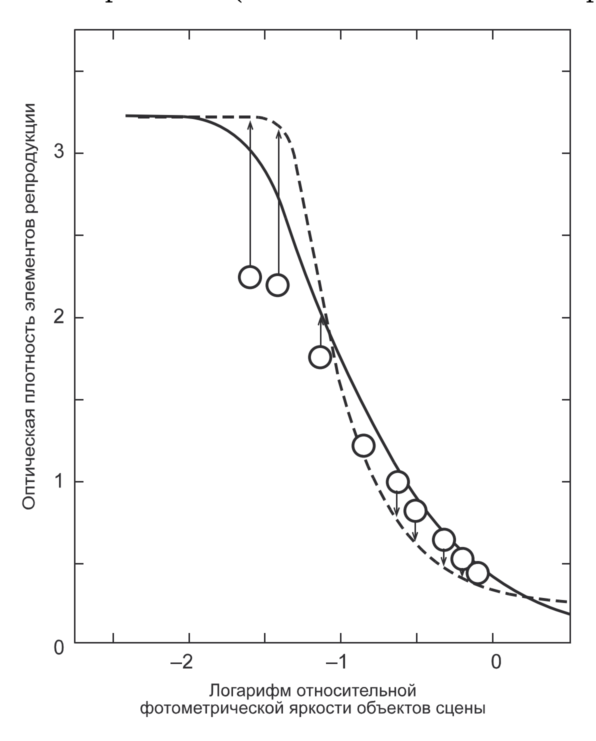


Рис. 6.16 Сенситометрическая кривая слайд-пленки, предназначенной к проекционному показу (сплошная линия), в сравнении с результирующей кривой такой же пленки, использованной в качестве контратипной без принудительной подсветки (пунктирная линия). Кружки демонстрируют результаты, полученные при наличии паразитной подсветки камеры и паразитной подсветки просмотра (взято с рис. 6.12). Стрелки указывают направление искажения оптических плотностей при использовании пленки данного типа в качестве контратипной.

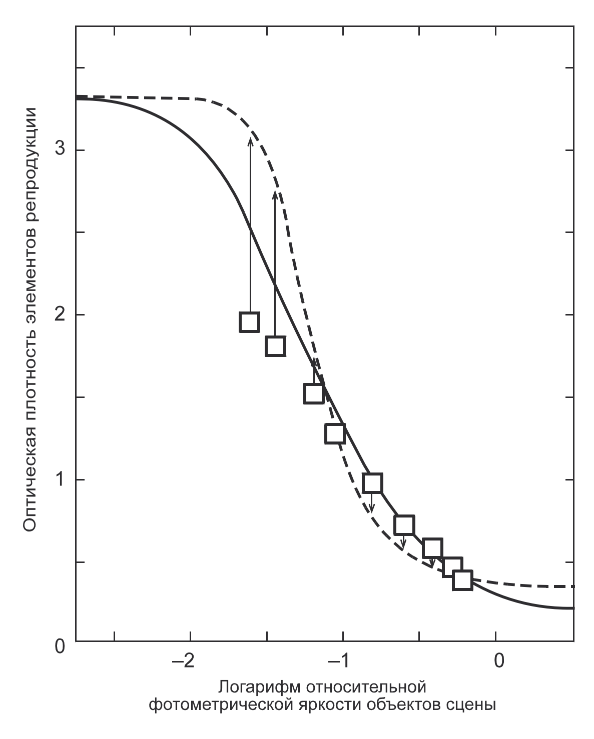


Рис. 6.17 То же, что на рис. 6.16, но по листовым слайдам.

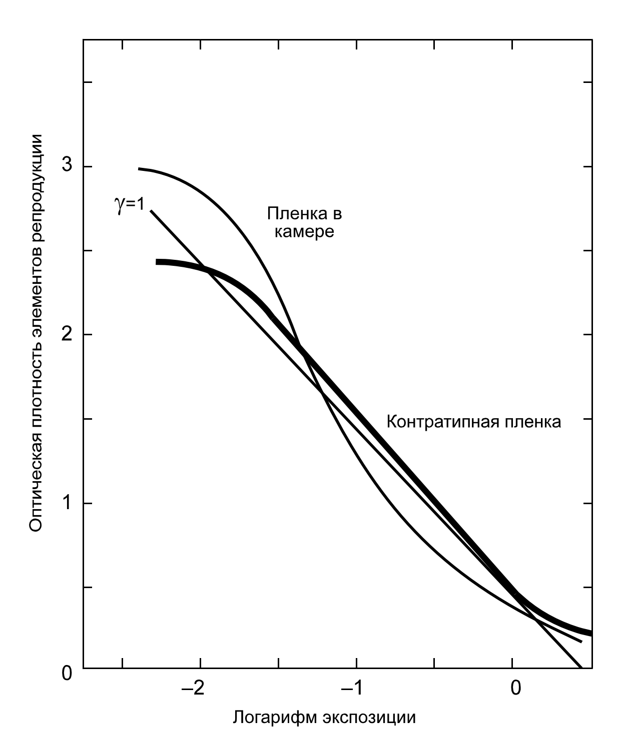


Рис. 6.18 Характеристическая кривая листового слайда (кривая «Пленка в камере») и характеристическая кривая дубль-пленки (гамма примерно равна 1.0), разработанной для производства листовых контратипов.

ную фотопленку, но при условии коррекции тоновой репродукции за счет соответствующих масок (см. раздел 15.2 и гл. 27) или цифровой обработки (см. гл. 29).

6.11 ТОНОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ В ТЕЛЕВИДЕНИИ

Условия просмотра телепередач обычно схожи с условиями просмотра листовых слайдов — просмотр ведется при слабом освещении, поэтому в обоих случаях окружение квалифицируется как тусклое. Следовательно, необходимая гамма равна 1.25, чего в цветном телевидении обычно добиваются передачей сигналов с гамма 1/2.2[1] с последующим показом на приемниках, имеющих гамма примерно 2.8[2] (см. раздел 19.13).

Когда в процессе получения телесигналов используется кинопленка, гамма должна быть уменьшена (от величины гамма пленки) до 1/2.2 (см. раздел 23.14).

Наличие паразитной подсветки, возникающей на разных этапах репродукционного процесса, усложняет ситуацию. Влияние подсветки обычно компенсируют за счет регулировки уровня яркости черной точки изображения (DeMarsh, 1972).

6.12 ГЕОМЕТРИЯ ОСВЕЩЕНИЯ

Геометрия освещения сцены может колоссально повлиять на результат тоновоспроизведения изображений (см. рис. 6.19). Управление освещением должно быть очень обдуманным и осторожным, и поэтому в кинематографии, фотографии и телевидении часто используются довольно сложные системы и техники освещения.

Визуальная контрастность изображения зависит не только от позиции, но также и от размеров источников освещения: применение небольших, компактных источников ведет к тому, что у теней появляются «заточенные» края, в то время как большие осветители дают мягкие тени, понижающие контрастность изображений. Размытые края, образующиеся при нахождении объектов далеко вне фокуса, также могут повлиять на визуальную контрастность изображений (по этой причине внефокусные элементы цветного изображения порой воспринимаются нежелательно светлыми, см. рис. 6.20).

6.13 ВЫВОДЫ

- ⇨ Когда средняя яркость рассматриваемого изображения и яркость его окружения аналогичны средней яркости оригинальной сцены, — тоновоспроизводящая система должна давать изображение с гамма, идеально равной единице.
- ⇨ Когда средняя яркость рассматриваемого изображения и яркость его окружения равны друг другу, но при этом отличны от средней яркости сцены, то единичная гамма по-прежнему даст наилучшую тонопередачу (за исключением экстравагантных условий, таких, как лунное освещение).
- ⇨ Чтобы привести гамма тонопередачи к единице, всегда необходим учет паразитной подсветки, и, следовательно, компоненты системы должны давать такую результирующую характеристическую кривую, у которой величина гамма суще-

---

[1] Гамма-предыскажение сигнала. — *Прим. пер.*

[2] Гамма-компенсация предыскажения. — *Прим. пер.*







Рис. 6.19 Ощущение пластики и глубины пространства при рассматривании двухмерных изображений сильно зависит от геометрии освещения сцены (см. раздел 6.12). Осмысленное управление светом при съемке крайне важно: к примеру, при создании этих трех изображений были задействованы одна и та же модель, одна и та же пленка, одна и та же камера — однако результаты репродуцирования сцены совершенно разные. Поэтому на кино- и телестудях зачастую используется очень сложное осветительное обрудование и очень сложная техника освещения.



Рис. 6.20 Малый диаметр зрачка, его способность к моментальному и автоматическому изменению этого диаметра по мере осмотра сцены, а также способность мозга игнорировать ненужную информацию — создают у наблюдателя впечатление, что все предметы постоянно находятся в фокусе. В изображениях, однако, эффекты расфокусировки проявляют себя в несравнимо большей степени, поскольку у объектива камеры диафрагма, как правило, большего диаметра (а также потому, что изображение само по себе воспринимается как предмет). Объекты, лежащие вне фокуса, имеют размытые края и могут иметь ощутимо бóльшую светлоту, нежели в реальных сценах. Управляя размером студийных источников освещения, можно управлять краевой резкостью в тенях и влиять на визуальную контрастность сцен и их репродукций (см. разделы 6.12 и 18.11).

ственно растет по мере подхода экспозиции к теневому концу тоновой шкалы. Однако необходимость обеспечения должной фотографической широты для сверх-светлых стимулов может потребовать некоторого отхода от концепции единичной гамма. То есть, характеристические кривые тоновоспроизводящих систем должны быть оптимизированы с учетом вышеперечисленных факторов.

⇨ Когда изображение рассматривается в темном окружении, как, скажем, при проекционном показе слайдов в темном помещении, темное окружение вызывает т.н. эффект «субъективной редукции серого», более всего выраженный в темных областях изображения, нежели в светлых. То есть, мы говорим, что темное окружение понижает визуальную контрастность. Поскольку оригинальные сцены обычно не рассматривают в темном окружении, то компенсация данного эффекта требует повышения гамма тонопередачи примерно до 1.5. Оптимальная характеристическая кривая фотоматериала, предназначенного к просмотру в

темном окружении, должна учитывать как данный фактор, так и паразитную подсветку (а также необходимость обеспечения должной фотографической широты).

⇨ Когда изображение рассматривается в тусклом окружении, как, например, в случае листовых слайдов на просмотровом столе или при просмотре телепередач, — необходимая гамма равна 1.25. Вместе с тем бывают и исключения, когда могут потребоваться более высокие значения гамма.

⇨ Высокие значения гамма тонопередачи, необходимые темному и среднему окружениям, делают тоновоспроизводящие системы непригодными для решения копировальных задач.

⇨ Геометрия освещения также влияет на тоновые характеристики изображений.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Bartleson, C.J., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 84, 613 (1975).
Bartleson, C.J., Ph.D. Thesis, The City University (1977).
Bartleson, C.J., and Breneman, E.J., Phot. Sci. Eng., 11, 254 (1967) and J. Opt. Soc. Amer., 57, 953 (1967).
Bartleson, C.J., Phot. Sci. Eng., 5, 327 (1961).
Breneman, E.J., Phot. Sci. Eng., 6, 172 (1962).
Breneman, E.J., J. Opt. Soc. Amer., 67, 657 (1977).
Burnham, R.W., Amer. J. Psychology, 65, 27 (1952).
Carnahan, W.H., Phot. Eng., 6, 237 (1955).
DeMarsh, L.E., J. Soc., Mot. Pic. Tel. Eng., 81, 784 (1972).
Doody, W.G., Lawton, J.K., and Perry, R.S., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 87, 373 (1978).
Estes, R.L., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 61, 257 (1953).
Evans, R.M., and Klute, J., J. Opt. Soc. Amer., 34, 533 (1944).
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 40, 362 (1950). See Figs. 3 and 4.
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 42, 190 (1952).
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 43, 479 (1953).
Hunt, R.W.G., J. Phot. Sci., 13, 108 (1965a).
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 55, 1540 (1965b).
Hunt, R.W.G., in Institute of Printing Conference Proceedings, Duplication and Conversion of Colour Transparencies, pp. 5–18 (1968).
Hunt, R.W.G., Pitt, I.T., and Ward, P.C., J. Phot. Sci., 17, 198 (1969).
Hunt, R.W.G., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 268 (1969).
Hunt, R.W.G., IS&T and SID's 7th Color Imaging Conference: Color Science Systems, and Applications, IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (1999).
Lighton, C., Phot. J., 107, 157 (1967).
Mahadev, S. and Henry, R.C., Color Res. Appl., 24, 112 (1999).
Perez-Carpinell, J., de Fez, M.D., Baldovi, R., and Soriano, J.C. Color Res. Appl., 23, 416 (1998).
Pitt, I.T., and Winter, L.M., J. Opt. Soc. Amer., 64, 1328 (1974).
Rowe, S.C.H., Ph.D. Thesis, The City University (1972).

7 ТРЕУГОЛЬНИК ЦВЕТНОСТЕЙ

7.1 ВВЕДЕНИЕ

В главах 2 и 4 недочеты обоих видов трихроматического цветовоспроизведения (аддитивного и субтрактивного) рассматривались в контексте рассуждений о кривых чувствительности трех типов колбочек сетчатки (ρ, γ и β). Такой подход хорош тем, что прям и прост, но в отношении физиологии зрения он требует ряда произвольных допущений, являясь к тому же лишь качественным, но не количественным. Реализация количественного подхода требует детального знакомства с феноменами трихроматического цветового уравнивания. Однако прежде кратко рассмотрим некоторые аспекты цветовой и колориметрической терминологий (CIE International Lighting Vocabulary, 1987).

7.2 ЦВЕТОВАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

7.2.1 Характеристики цветового ощущения

Принято считать, что у цветового ощущения (цвета) три т.н. *перцепционных* (чувственных) параметра.

Наиболее очевидный из них — *цветовой тон* (*Hue*).

⇨ *Цветовой тон* — это показатель того, что стимул воспринимается либо красным, либо оранжевым, либо желтым, либо зеленым, либо синим, либо пурпурным (либо как «смесь» соседних пар из данного списка).

⇨ *Полнота цвета* (*Colorfulness*) означает степень выраженности цветового тона.

Полнота цвета равна нолю у белого, серого и черного; низка у пастельных цветов; высока у цветов, вызванных монохроматическими стимулами.

⇨ *Субъективная яркость* (*Brightness*) — это атрибут зрительного ощущения, согласно которому область просмотра воспринимается как испускающая большее или меньшее количество света.

Субъективная яркость обычно предельно высока у солнца, очень высока у многих источников света, достаточно высока у белого и желтого стимулов, средняя у серого и коричневого и низкая у черного.[1]

Предметы, рассматриваемые при высокой освещенности, обычно выглядят ярче, чем при низкой (даже когда наблюдатель полностью адаптирован к каждой из освещенностей), однако в крайне важной биологической задаче распознавания объектов

---

[1] Раньше вместо термина «субъективная яркость» часто использовалось существительное «*светность*» (*luminosity*).

большее значение имеют т.н. *относительные субъективные яркости*, то есть субъективные яркости объектов, оцениваемые друг относительно друга, к примеру: фрагмент серой бумаги, рассматриваемый на солнечном свету, будет выглядеть ярче, чем при бытовом освещении, но при этом он по-прежнему будет оставаться серым (и не станет черным), поскольку его субъективная яркость оценивается относительно прочих объектов сцены. Понятие «относительная субъективная яркость» очень важно, и для него существует отдельный термин — *светлота* (*lightness*).

⇨ *Светлота* — это субъективная яркость некой области в поле зрения, оцениваемая относительно субъективной яркости сходным образом освещенного объекта, воспринимаемого как белый (а в случае прозрачных объектов — как высокопрозрачный).

Когда меняется уровень освещенности, к которому был адаптирован наблюдатель, то изменяется не только субъективная яркость объектов, но также и их полнота цвета. Таким образом, объекты одной и той же сцены, которые выглядят весьма полноцветными на ярком солнечном свету, несколько тускнеют в пасмурный день и еще больше блекнут вечером, а в рассветных сумерках совсем теряют полноту своего цвета. Но, опять же, в важнейшей задаче распознавания объектов весьма значим такой параметр как *относительная полнота цвета* предметов: красный помидор, рассматриваемый на ярком солнечном свету, будет восприниматься ярче окрашенным, чем при бытовом освещении в пасмурный день, но мы по-прежнему будем воспринимать его красным (а не розовым), поскольку полнота его цвета оценивается относительно прочих объектов в сцене. Итак, относительная полнота цвета именуется *насыщенностью* (*chroma*).

⇨ *Насыщенность* — это полнота цвета некоей области, оцененная по отношению к субъективной яркости сходным образом освещенного объекта, воспринимаемого как белый (или высокопрозрачный).

Таким образом, несмотря на то, что помидор в пасмурный день будет иметь меньшую полноту цвета, чем в солнечный, — белые объекты в поле зрения будут обладать при этом меньшей субъективной яркостью, что позволит наблюдателю отнести малую полноту цвета объектов на счет слабого освещения, но не на счет изменений, происходящих якобы в самом объекте. В итоге мы говорим, что помидор будет восприниматься с постоянной *насыщенностью*.

Полноту цвета объекта также можно оценить по отношению к субъективной яркости самого объекта (но не белого эталона). Результатом такой оценки явится величина т.н. *чистоты цвета* (*saturation*).

Уровень освещенности обычно различен на различных участках поверхности предметов (поскольку они трехмерны и на них образуются тени), в результате чего бывает сложно выбрать ту часть белого объекта, по которой должна проводиться оценка. Сказанное означает, что суждение о светлоте и насыщенности разных участков объекта затруднительно, но всегда остается возможность оценить их по параметру цветового тона и чистоты цвета. Таким образом, в примере с помидором суждение о его цветовом тоне, светлоте и насыщенности можно высказать только в отношении той его части, что освещена прямым светом (светом, падающим по нормали к поверхности), но о цветовом тоне в связке с чистотой цвета мы можем говорить в отношении любого участка его поверхности. Следовательно, когда оценивается равномерность окраски помидо-

ра, цветовой тон и чистота цвета предпочтительнее, чем цветовой тон, светлота и насыщенность.

Когда речь идет об источниках света, нельзя говорить о «сходным образом освещенных объектах», и, следовательно, светлота и насыщенность неуместны. Таким образом, атрибуты перцепционной оценки источников света сокращаются до цветового тона, полноты цвета, субъективной яркости и чистоты.

До 1987 г. понятия «полнота цвета», «насыщенность» и «чистота цвета» именовались единым термином «чистота цвета» (Hunt, 1977 и 1978), однако четвертое издание Международного Светотехнического словаря (CIE, 1987) указывает на различие между перечисленными понятиями, а также позволяет пользоваться термином «*хроматичность*» (*chromaticness*) вместо «полноты цвета».

В отношении субъективной яркости употребляются прилагательные «яркий» и «тусклый»; в отношении светлоты — «светлый» и «темный»; в отношении насыщенности — «сильная» и «слабая».

7.2.2 Субъективные и объективные аспекты цвета

В цветоведении крайне важен учет как зрительного отклика наблюдателя (субъект), так и физический характер цветового стимула (объект), то есть необходимо четко различать субъективные и объективные аспекты цвета.

Понятия «цветовой тон», «полнота цвета», «субъективная яркость», «светлота», «насыщенность» и «чистота цвета» (о которых речь шла выше) — сугубо субъективны.

Объективные понятия отражают результат количественных измерений цветовых стимулов и, в отличие от субъективных атрибутов цвета, их величины не зависят от статуса адаптации наблюдателя. Таким образом, весьма желательным является измерение величин, *коррелирующих* с субъективными атрибутами цветового ощущения (см. ниже):

Субъективные понятия	Объективные понятия	Символ
Цветовой тон (Hue)	Доминирующая длина волны цветового стимула *Угол цветового тона* (CIE 1976)	λ_d h_{uv} или h_{ab} (h или H)
Субъективная яркость (Brightness)	Фотометрическая яркость (Luminance)	L (Q)
Полнота цвета (Colofulness)		(M)
Светлота (Lightness)	Коэффициент яркости *Светлота* (CIE 1976)	β (J) L^*
Насыщенность (Chroma)	*Насыщенность* (CIE 1976)	C^*_{uv} или C^*_{ab} (C)
Чистота цвета (Saturation)	Колориметрическая чистота (Purity) *Чистота цвета* (CIE 1976)	p s_{uv} (s)
Цветовой тон и чистота цвета	Цветность (Chromaticity)	xy или $u'v'$

Как мы видим, по отдельным субъективным атрибутам даны два объективных понятия: второе понятие (выделенное курсивом) имеет бо́льшую равномерность корреляции с субъективным атрибутом, нежели первое (см. гл. 8). Символы в скобках отно-

сятся к величинам, которыми оперируют т.н. модели цветового восприятия CIECAM97s и CIECAM02 (см. гл. 35 и Приложение 6).

Теперь рассмотрим объективные характеристики цветовых стимулов:

- ⇨ *Доминирующая длина волны* определена как длина волны монохроматического стимула, аддитивно смешанного в определенной пропорции с ахроматическим стимулом (белым или серым) с целью достижения визуального соответствия с исследуемым цветовым стимулом. В случае пурпурных стимулов используется т.н. *дополнительная длина волны* (λ_c).
- ⇨ *Дополнительная длина волны* — это длина волны монохроматического стимула, смешанного с исследуемым стимулом с целью достижения визуального соответствия с определенным ахроматическим цветовым стимулом.
- ⇨ *Фотометрическая яркость* — это интенсивность светового потока в данном направлении на единицу площади поверхности (единицы даны в Приложении 3).
- ⇨ *Коэффициент фотометрической яркости* — это отношение фотометрической яркости стимула к яркости так же освещенного идеального отражающего (или пропускающего) рассеивателя (идеальность рассеивателя предполагает, что он равномерен, изотропичен [независим от направления] и с нулевой поглощательной способностью).
- ⇨ *Коэффициенты отражения* и *пропускания* используются соответственно в отношении отражающих и пропускающих образцов и в данном случае определены как отношение количества света, отраженного (или пропущенного) образцом в пределах определенного конуса по отношению к свету, отраженному (или пропущенному) идеальным отражающим (или пропускающим) рассеивателем в пределах того же конуса. Если конус является полусферой, отношение определено как *отражательная* или *пропускательная способности*. Если конус очень мал, данные величины и коэффициент яркости — одно и то же.
- ⇨ *Поглощательная способность* равна единице за вычетом отражательной и/или пропускательной способностей.
- ⇨ *Коэффициент непрозрачности, непрозрачность* (*opacity*) — величина обратная отражательной или пропускательной способности.
- ⇨ *Колориметрическая чистота* — мера удельного количества монохроматического стимула (или — в случае пурпурных стимулов — спектральной смеси красного и фиолетового) в смеси с определенным ахроматическим стимулом, необходимая для достижения визуального соответствия с исследуемым цветовым стимулом.
- ⇨ *Цветность* (*chromaticity*) — определена как соотношение количеств трех уравнивающих стимулов, требуемое для достижения визуального соответствия с исследуемым стимулом.

Различие между объективными и субъективными атрибутами цвета очень важно понимать, и поскольку в большинстве контекстов рассматриваются лишь общие положения, строгое соблюдение вышеупомянутой терминологии является обязательным. В нашей книге мы будем оперировать в основном субъективными понятиями, поскольку они широко распространены и, как говорят — интуитивны.

7.2.3 Манселловская система цветовой спецификации

Теперь два слова о т.н. *манселловской системе цветовой спецификации*, где физические цветовые образцы подобраны и расположены так, чтобы субъективное ощущение, возникающее при переходе от одного образца к другому, было максимально плавным (равномерным).

Манселловский цветовой тон (*Munsell Hue*) представляет перцепционно равные отличия по цветовому тону с более или менее постоянным шагом; *манселловская светлота* (*Munsell Value*) — перцепционно равные отличия по светлоте; *манселловская насыщенность* (*Munsell Chroma*) — равные отличия по насыщенности.

Цена деления шкал в манселловской системе такова, что 1 единица манселловской светлоты соответствует примерно 2 единицам манселловской насыщенности, а 3 единицы манселловского цветового тона — 5 единицам манселловской насыщенности (Newhall, 1940). Физическим воплощением манселловской системы является манселловский атлас (рис. 7.0).[1]

Далее колориметрическая и цветовая терминологии будут рассматриваться в гл. 8.

7.3 ТРИХРОМАТИЧЕСКОЕ УРАВНИВАНИЕ

При визуальном сравнении цветовых стимулов с аддитивной смесью красного, зеленого и синего уравнивающих (кардинальных) стимулов обнаруживается, что, манипулируя относительными или абсолютными количествами последних, всегда можно получить цветовой стимул, ощущение от которого будет идентично тому, которое вызывает любой произвольно выбранный стимул (рис. 7.1). Ряд цветовых стимулов, обладающих очень высокой колориметрической чистотой, казалось бы, являются исключением из приведенного правила, но, как будет показано далее, с помощью специальных методик их тоже можно уравнять.

Феномен трихроматического уравнивания легко объясним в логике трехкомпонентной теории цветового зрения: поскольку все цветовые стимулы характеризуются сетчаткой лишь через три различных типа отклика — ρ,γ и β (вероятнее всего, пропорционально поглощению тремя фоточувствительными пигментами), человек не видит разницы между двумя стимулами, вызывающими одни и те же ρ-,γ- и β-сигналы (причем независимо от того, каков спектральный состав этих двух стимулов). Отличие в спектральном распределении энергии двух уравненных стимулов может оказаться весьма впечатляющим, к примеру, стимул, энергия которого заполняет весь видимый спектр, может визуально соответствовать свету, состоящему из трех узких спектральных полосок (рис. 7.2), но, поскольку оба стимула вызывают идентичные ρ-,γ- и β-отклики, то, будучи предъявленными в одинаковых условиях, визуально они окажутся неразличимы.

⇨ Два стимула, имеющие различный спектральный состав, но оказывающие на зрительную систему одинаковое трихроматическое воздействие (т.е. визуально идентичные в одних и тех же условиях просмотра), именуются *метамерной парой* или *метамерами*.

Примечательно, что цветовой тон и субъективную яркость ряда стимулов высокой

[1] Подробнее см. М.Фершильд, «Модели цветового восприятия» — *Прим. пер.*

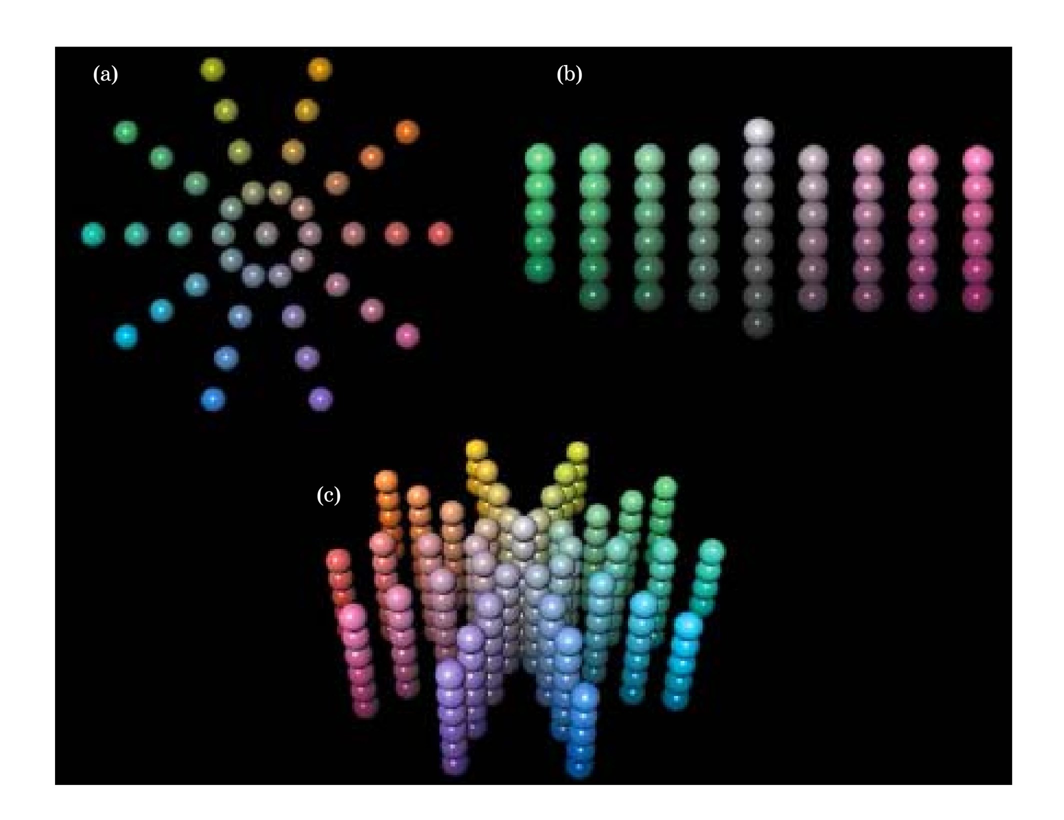




Рис. 7.0 *Вверху*: компьютерная визуализация образцов манселловской системы: (a) — плоскость постоянной светлоты; (b) — две плоскости постоянного цветового тона; (c) — трехмерное представление системы.

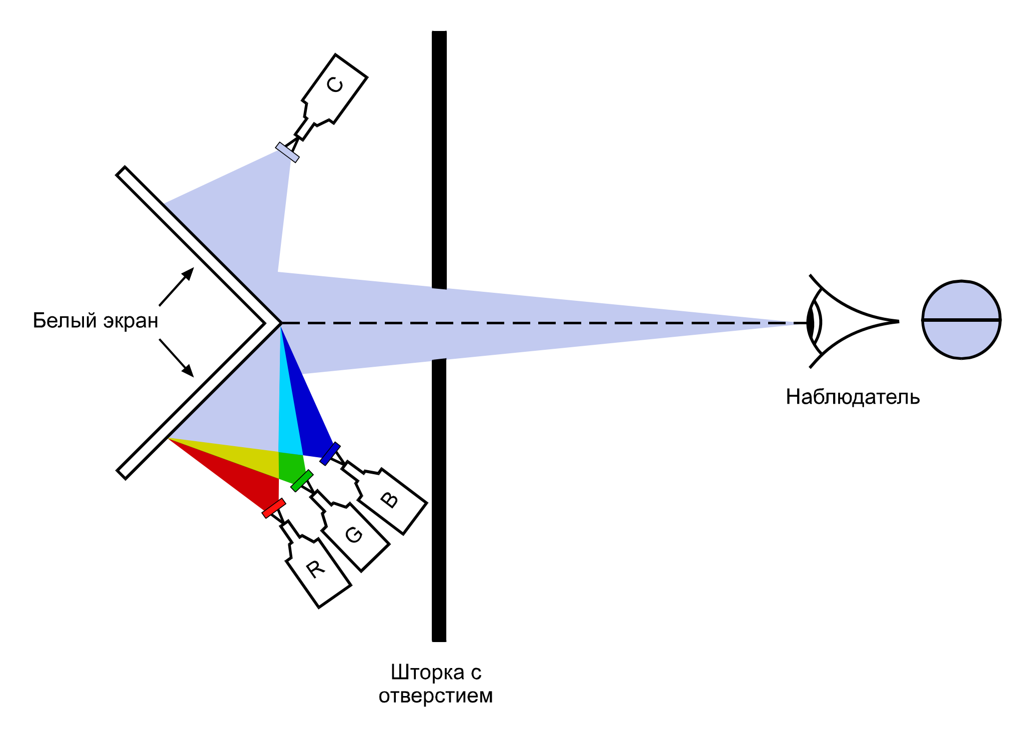


Рис. 7.1 Принцип трихроматического уравнивания. Верхний экран освещен только светом тестового стимула C. Нижний экран освещен смесью красного, зеленого и синего лучей, исходящих от проекторов R, G и B. Управляя интенсивностями красного, зеленого и синего потоков в смеси, можно добиться идентичности ее зрительного восприятия со стимулом C.

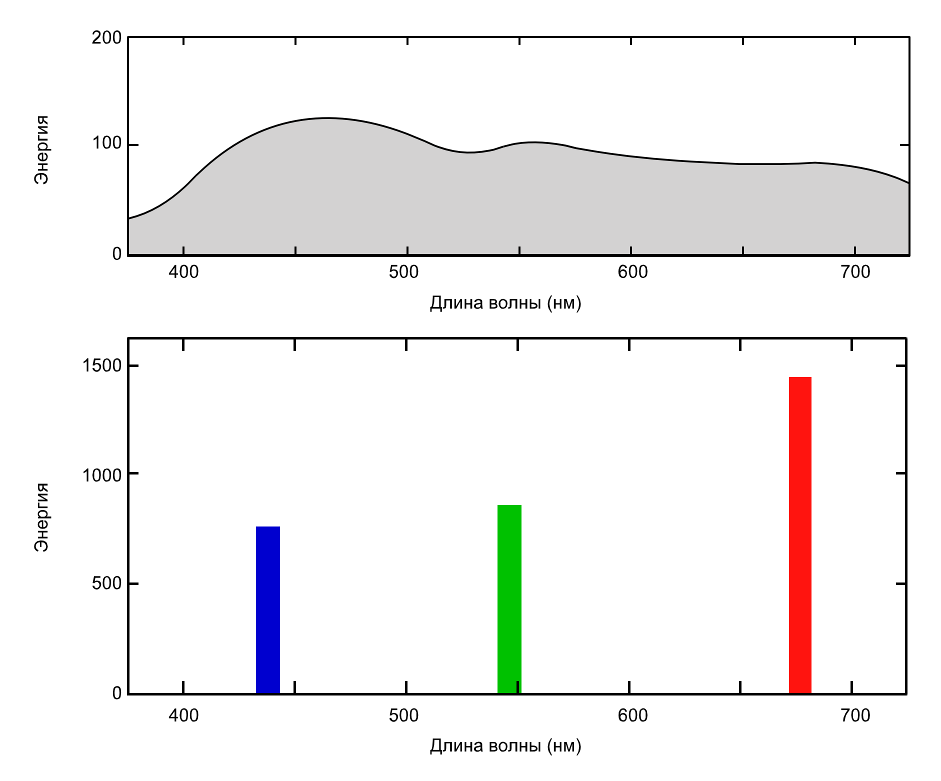


Рис. 7.2 На верхнем рисунке показано спектральное распределение энергии белого света. На нижнем — спектральное распределение света, воспринимаемого точно таким же.
Примечание: энергетические ординаты графиков различны.

колориметрической чистоты и большинства монохроматических стимулов можно точно воспроизвести с помощью смеси красного, зеленого и синего световых потоков. Вместе с тем удовлетворительного соответствия по полноте цвета не удается добиться никогда. Сказанное особо касается сине-зеленых монохроматов: смесь только синего и зеленого световых потоков в состоянии воспроизвести стимул, цветовой тон и субъективная яркость которого будут те же, что и у исследуемого стимула, но полнота цвета всегда окажется ниже.

С одной стороны, можно говорить, что сей факт дискредитирует трихроматическую теорию цветового зрения, но фактически он прогнозируется ею, что видно по рис. 7.3, на котором даны кривые чувствительности трех ретинальных рецепторов ρ-,γ- и β.

Давайте рассмотрим случай, когда красный, зеленый и синий световые потоки (R, G и B) являются максимально чистыми, то есть, возьмем монохроматический свет с длиной волны 650 нм — красный (R), монохроматический свет с длиной волны 530 нм — зеленый (G) и 460 нм — синий (B).

Теперь предположим, что мы пытаемся уравнять по визуальному восприятию монохроматический свет с длиной волны 490 нм (сине-зеленый).

Понятно, что красный стимул вызовет ρ-отклик, но не вызовет γ- и β-откликов.

Зеленый стимул вызовет в основном γ-отклик, но также и немалый ρ-отклик, а β-отклик — лишь весьма незначительный.

Синий стимул даст в основном отклик β с небольшой добавкой γ-отклика, но отклика ρ не будет.

Отклики, представленные на рис. 7.3 в виде удельных мощностей каждого из трех стимулов RGB, могут быть расположены в виде таблицы:

R-стимул	$\rho = 24$	$\gamma = 0$	$\beta = 0$
G-стимул	$\rho = 56$	$\gamma = 92$	$\beta = 4$
B-стимул	$\rho = 0$	$\gamma = 9$	$\beta = 75$

Теперь по исследуемому монохроматическому стимулу с длиной волны 490 нм:

$$\rho = 8 \qquad \gamma = 26 \qquad \beta = 26$$

Следовательно, чтобы добиться визуального уравнивания исследуемого стимула со смесью стимулов RGB (кардинальных стимулов), необходимо выбрать такие количества последних, которые вызовут те же величины колбочковых откликов.

Поскольку B-стимул дает в основном β-отклик, мы выбираем одну треть от его мощности, дабы получить бóльшую часть требуемого β-отклика. Таким образом, имеем:

По 1/3 мощности B-стимула	$\rho = 0$	$\gamma = 3$	$\beta = 25$

Коль скоро нам необходимы еще 23 единицы γ-отклика и поскольку R-стимул их дать не может, мы можем получить нужное количество γ-отклика при помощи G-стимула, и понадобится нам 1/4 его мощности. Таким образом:

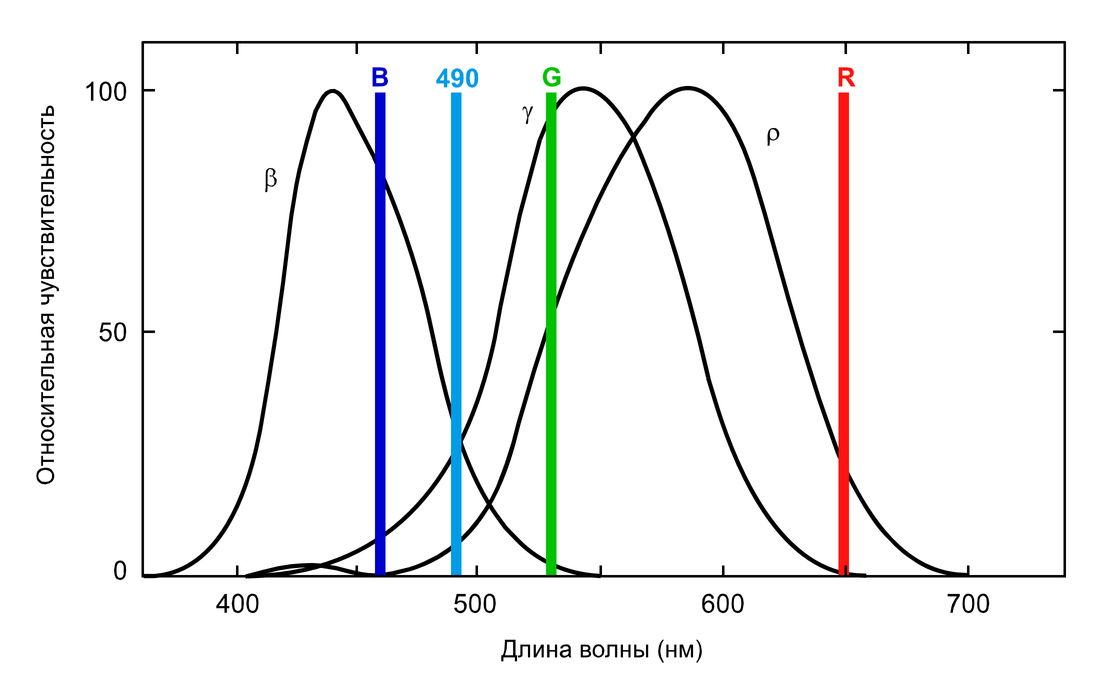


Рис. 7.3 Типичный набор кривых ρ, γ, β, представляющих предполагаемые кривые спектральной чувствительности фоторецепторов сетчатки глаза (взято с рис. 2.2).

При 1/4 мощности G-стимула ρ = 14 γ = 23 β = 1

Следовательно, 1/3 мощности стимула B и 1/4 мощности стимула G в сумме дадут:

ρ = 14 γ = 26 β = 26

Понятно, что, хотя мы и добились корректных величин откликов γ и β, мы получили при этом ρ-отклик почти вдвое больший, чем необходимо (при этом даже не добавляя стимул R — поскольку его добавка еще больше увеличит ρ-отклик, сделав смесь еще менее похожей на тестовый стимул). Таким образом, не существует варианта смеси монохроматических световых потоков с длинами волн в 650, 530 и 460 нм, способного обеспечить визуальное равенство с монохроматическим стимулом с длиной волны 490 нм (что полностью подтверждается экспериментально).

Сей факт, однако, вполне предсказуем по кривым рис. 7.3, которые являются *количественным выражением* трихроматической теории цветового зрения (но не ее опровержением): ρ- и β-кривые рис. 7.3 накладываются друг на друга, в результате чего возбудить одни только γ-колбочки принципиально невозможно. Следовательно, высокочистые сине-зеленые стимулы не могут быть уравнены аддитивными смесями красного, зеленого и синего световых потоков.

Когда в качестве уравнивающих (кардинальных) стимулов выбраны монохроматические потоки с различными длинами волн или когда уравнивающие стимулы состоят из широких спектральных полос, — всегда найдутся колориметрически чистые стимулы, которые невозможно будет уравнять по зрительному ощущению.

Монохроматический стимул с длиной волны 490 нм уравнять удается тогда, когда он оказывается в составе тройки уравнивающих стимулов, но в этом случае всегда най-

дутся другие монохроматические стимулы, которые не поддаются трихроматическому уравниванию.

7.3.1 Отрицательные значения

Однако вернемся к исходным трем стимулам RGB с длинами волн соответственно 650, 530 и 460 нм.

Понятно, что когда вместо того, чтобы добавлять часть стимула R к смеси, состоящей из 1/3 мощности стимула B и 1/4 мощности стимула G, мы добавим ее к стимулу *уравниваемому* (490 нм), мы все-таки сможем получить цветовое соответствие: в данный момент мы имеем 14 единиц ρ-отклика по уравнивающей смеси, но только 8 единиц ρ-отклика по исследуемому стимулу, и понятно, что добавка 6 единиц ρ-отклика по исследуемому стимулу приведет к его визуальному уравниванию со смесью G- и B-стимулов. Итак, необходимую величину ρ-отклика по исследуемому стимулу получаем добавкой к нему 1/4 мощности стимула R:

Для 1/4 мощности R-стимула	$\rho = 6$	$\gamma = 0$	$\beta = 0$

Таким образом, получаем ситуацию, при которой:

Исследуемый (уравниваемый) стимул (490 нм) + 1/4 мощности стимула R
соответствуют по зрительному ощущению
1/4 мощности стимула G + 1/3 мощности стимула B

Добавку одного из уравнивающих стимулов к стимулу уравниваемому (а не к смеси уравнивающих) обычно отмечают знаком «минус»:

Исследуемый (уравниваемый) стимул (490 нм)
соответствует по зрительному ощущению
1/4 мощности стимула G + 1/3 мощности стимула B – 1/4 мощности стимула R.

Опираясь на принцип отрицательных значений, все цветовые стимулы можно описать путем выбора соответствующих пропорций трех аддитивно смешанных уравнивающих стимулов. Отметим, что отрицательные значения возникают вследствие т.н. *паразитного возбуждения* колбочек, вызываемого уравнивающими стимулами R, G и B (см. раздел 2.5).

7.4 ТРИХРОМАТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Коль скоро у нас есть возможность описать любой цветовой стимул с помощью аддитивной смеси трех уравнивающих стимулов (как было показано выше), то теоретически мы можем специфицировать все цветовые стимулы видимого спектра. Такая работа была выполнена практически, и ее результат чаще всего представляют в виде трех кривых (рис. 7.4), в которых определенные количества R-, G- и B-стимулов, требуемые для визуального уравнивания монохроматических стимулов по каждой из длин волн (с малым шагом), даны как функция от длины волны.

Как и следовало ожидать, экстремум каждой кривой приходится на ту зону спектра, где находится соответствующий уравнивающий стимул, также стоит отметить, что все три кривые содержат участки с отрицательными значениями (наибольший у R-стимула в сине-зеленой части спектрального диапазона).

Для удобства необходимые количества RGB-стимулов выражают, как правило, не

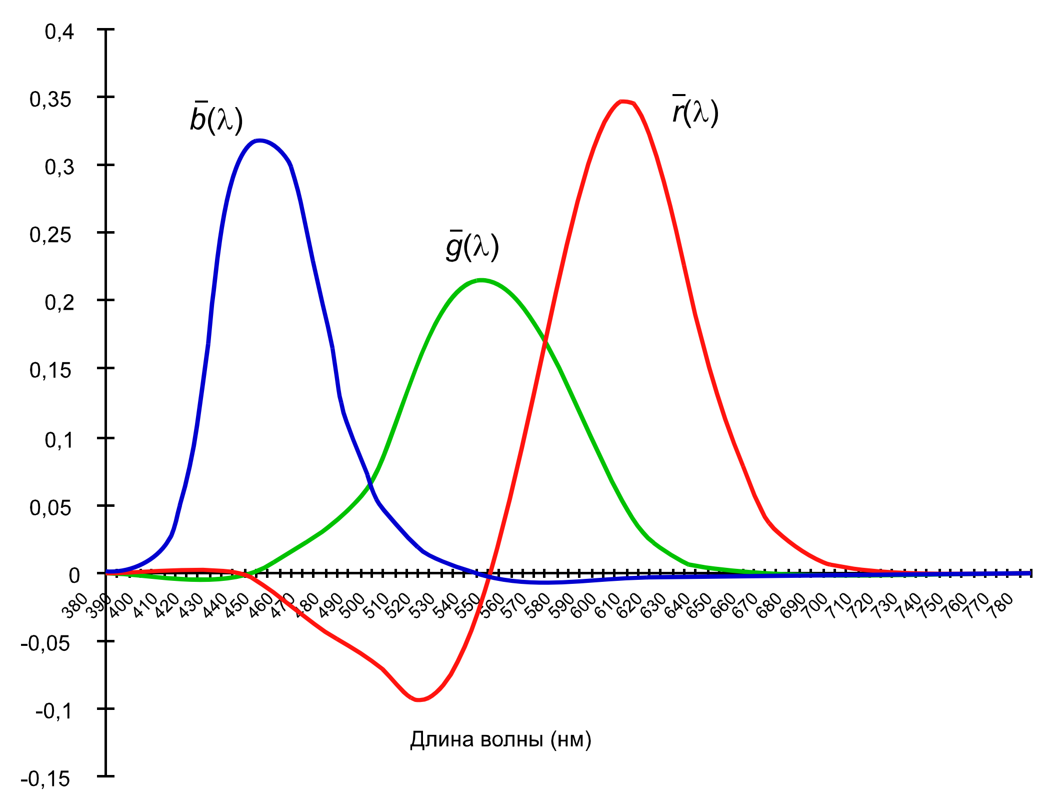


Рис. 7.4 Трихроматические кривые зрительной системы человека, демонстрирующие $\bar{r}(\lambda)$-, $\bar{g}(\lambda)$-, $\bar{b}(\lambda)$-количества монохроматических уравнивающих RGB-стимулов (с длинами волн 650, 530 и 490 нм соответственно), необходимые для визуального уравнивания единичных спектральных (монохроматических) стимулов (с шагом в 10 нм по всему видимому спектру); единичные колориметрические количества RGB-стимулов уравнивают цвет равноэнергетического источника S_E.

в удельных энергиях, а в произвольных безразмерных единицах, полученных исходя из того, что некий белый стимул уравнен равновеликими значениями RGB-стимулов.

На рис. 7.4 в качестве источника белого света[1] использован гипотетический стимул, энергия которого по всем длинам волн видимого спектра одинакова. Такой источник весьма значим в колориметрии и именуется *равноэнергетическим источником* (S_E). Когда колориметрические единицы задаются по иному источнику, или когда единицы определены фотометрически (к примеру, в канделах на метр квадратный или люксах), или когда используются энергетические единицы, — кривые не будут отличаться по форме, но только по высоте: ординаты всех трех окажутся умноженными на три различных коэффициента.

Ординаты данных кривых принято обозначать соответственно как $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$, а сами кривые именовать *кривыми смешения* (color-mixture curves), *функциями цветового соответствия* (color-matching functions) или *трихроматическими кривыми* зрительной системы человека.

Колориметрическая интерпретация трихроматических кривых зрительной системы человека звучит так: монохроматический стимул с длиной волны λ вызывает точно

[1] Т.н. «опорного белого света». — *Прим. пер.*

такое же зрительное ощущение, что и смесь удельных количеств стимула R, стимула G и стимула B. Аналогично по каждому монохроматическому стимулу (с постоянным малым шагом) во всем диапазоне видимого спектра, то есть:

$\bar{r}(\lambda)$ единиц стимула R + $\bar{g}(\lambda)$ единиц стимула G + $\bar{b}(\lambda)$ единиц стимула B

Вышеприведенное высказывание удобнее сократить до:

$$1.0(\lambda) \equiv \bar{r}(\lambda)(R) + \bar{g}(\lambda)(G) + \bar{b}(\lambda)(B),$$

где знак эквивалентности (≡) подразумевает то, что данное уравнение представляет равенство по цветовому ощущению; символы R, G, и B, данные в скобках, означают не количества стимула, а лишь то, к какому стимулу относятся коэффициенты $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$.

Экспериментально показано, что приведенное равенство, как правило, подчиняется обычным алгебраическим правилам, к примеру, если некий коэффициент k постоянен, то:

$$k(\lambda) \equiv k\bar{r}(\lambda)(R) + k\bar{g}(\lambda)(G) + k\bar{b}(\lambda)(B)$$

Более того, если k_1 энергетических единиц монохроматического стимула с длиной волны λ_1 и k_2 единиц монохроматического стимула с длиной волны λ_2 представлены уравнениями:

$$k_1(\lambda_1) \equiv k_1\bar{r}_1(R) + k_1\bar{g}_1(G) + k_1\bar{b}_1(B)$$

$$k_2(\lambda_2) \equiv k_2\bar{r}_2(R) + k_2\bar{g}_2(G) + k_2\bar{b}_2(B)$$

то:

$$k_1(\lambda_1) + k_2(\lambda_2) \equiv (k_1\bar{r}_1 + k_2\bar{r}_2)(R) + (k_1\bar{g}_1 + k_2\bar{g}_2)(G) + (k_1\bar{b}_1 + k_2\bar{b}_2)(B),$$

что также подтверждено экспериментально.

Данное свойство колориметрических равенств именуется «*аддитивностью*» и может быть распространено на все длины волн видимого спектра:

$$k_1(\lambda_1) + k_2(\lambda_2) + \ldots \equiv (k_1\bar{r}_1 + k_2\bar{r}_2 + \ldots)(R) + (k_1\bar{g}_1 + k_2\bar{g}_2 + \ldots)(G) + (k_1\bar{b}_1 + k_2\bar{b}_2 + \ldots)(B)$$

Все цветовые стимулы, будь они монохроматическими (т.е. спектрально чистыми) или, наоборот, почти серыми, светлыми или темными (и при любом цветовом тоне), — состоят из смеси спектральных стимулов, взятых в разных количествах. Следовательно, если нам известно спектральное распределение энергии некоего стимула, то при помощи кривых рис. 7.4 или табличных значений $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ можно высчитать количества стимулов R, G и B, необходимые для его визуального уравнивания. Результаты таких вычислений будут четко согласовываться с величинами, полученными при уравнивании экспериментальном.

7.4.1 Применение спектрометрии в колориметрических целях

Теперь предположим, что некий стимул C представлен спектральным распределением $E(\lambda)$. При помощи кривых рис. 7.4 мы можем рассчитать количества стимулов R, G и B, необходимые для его визуального уравнивания, исходя из того, что:

$$(C) \equiv R_C(R) + G_C(G) + B_C(B)$$

где:

$$R_C = E_1\bar{r}_1 + E_2\bar{r}_2 \ldots + E_n\bar{r}_n$$

$$G_C = E_1\bar{g}_1 + E_2\bar{g}_2 \ldots + E_n\bar{g}_n$$

$$B_C = E_1\bar{b}_1 + E_2\bar{b}_2 \ldots + E_n\bar{b}_n,$$

а подстрочные индексы от 1 до n указывают на серию длин волн с равными интервалами по всему видимому спектру. Количества стимулов R, G и B, необходимые для получения визуального равенства со стимулом C, обозначены как R_C, G_C и B_C и именуются *трехстимульными значениями* (*tristimulus values*) стимула C.

Теперь представим себе, что некая трихроматическая фотографическая система создает изображение при помощи все тех же красного, зеленого и синего монохроматических световых потоков с длинами волн соответственно 650, 530 и 460 нм. Предположим также, что изображение реальной сцены фокусируется на эмульсии, состоящей из трех слоев фильтр/сенсор. И допустим, что кривые спектральной чувствительности слоев эмульсии точно такие же, как на рис. 7.4 (предполагается, что участок отрицательных значений реализован на практике). Итак, на примере лишь «красного» негативного слоя покажем, что экспозиция N_R будет пропорциональна выражению:

$$E_1\bar{r}_1 + E_2\bar{r}_2 + E_3\bar{r}_3 \ldots + E_n\bar{r}_n$$

Если фотосистема линейна, выход скрытого изображения на негативе (I_R)[1] будет пропорционален N_R, а пропускание на позитиве (T_R) будет пропорциональным I_R. Следовательно, проектирование позитива с пропусканием T_R автоматически приведет к kR_C по стимулу R, спроектированному на экран, а k будет постоянным по всей области изображения, то есть: количество стимула R по всему полю будет пропорционально величине, необходимой для уравнивания стимулов оригинальной сцены.

Аналогично пропускание позитива по зеленому (T_G) будет пропорционально G_C— количеству стимула G, необходимому для уравнивания с оригиналом. То же касается пропускания по синему стимулу T_B. Таким образом, любой цветовой стимул оригинальной сцены, представленный как:

$$(C) \equiv R_C(R) + G_C(G) + B_C(B)$$

на репродукции будет воспроизведен как:

---

[1] Литера «I» означает «image» — изображение; подстрочный индекс «R» означает «red» — красный. — *Прим. пер.*

$$(C') \equiv kR_C(R) + kG_C(G) + kB_C(B)$$

Следовательно, все, что требуется для высокоточного цветового репродуцирования оригинала,[1] — это привести k к единице, дабы яркость элементов репродукции была той же, что и яркость объектов оригинальной сцены (Hardy and Wurzburg, 1937; Harrison and Horner, 1937). Условия, которые должны быть при этом соблюдены, таковы:

1. Условие Лютера —Айвса: кривые спектральной чувствительности слоев фотоэмульсии, использованной для получения трех негативов, должны быть идентичны трихроматическим кривым зрительной системы человека (или линейной комбинации этих кривых) по трем воспроизводящим (кардинальным) стимулам, используемым при создании финального изображения, т.е. цветного отпечатка.

2. Пропускание позитивов должно быть пропорционально экспозиции соответствующих точек негативов.

3. Просмотровая освещенность должна быть подобрана так, чтобы элементы изображения имели ту же яркость, что и объекты оригинала.

Условиям 2 и 3 удовлетворить не сложно, но требование 1 из-за отрицательных значений в трихроматических кривых зрительной системы в реальных условиях выполнить совершенно невозможно: слои фотоэмульсии нужно сенсибилизировать так, чтобы экспонирование светом одной части спектра ослабляло скрытое изображение, сформированное светом других частей спектра. Таким образом, к примеру, в случае «красного» негатива, экспозиция светом сине-зеленой части спектра (длины волн от 460 до 530 нм) должна ослаблять выход скрытого изображения, образованного светом красной (и синей) частей спектра. Впрочем, за счет использования специальных раздвоенных негативных слоев (один под положительные участки кривой, другой — под отрицательные) и при условии точной приводки позитивов добиться результата можно по крайней мере теоретически (см. MacAdam, 1938, стр. 405).

На практике, однако, данный метод весьма трудоемок и неточен, и, хотя пленочная фотография по-прежнему существует, способов «вмонтировать» участки отрицательных значений в кривые спектральной чувствительности общей репродукционной фотосистемы — нет.

Вместе с тем в цветном телевидении дело обстоит проще (по крайней мере в общем принципе): если один сенсор телекамеры имеет спектральную чувствительность, идентичную участкам положительных значений «красной» кривой, а другой — идентичную участку отрицательных значений (рис. 7.5), то за счет вычитания второго из первого получим «красный» сигнал, основанный на кривой чувствительности, эквивалентной полной трихроматической кривой зрительной системы человека по красному кардинальному стимулу. Аналогично можно поступить в отношении зеленого и синего уравнивающих стимулов, что в конечном счете приведет к использованию в камере шести сенсоров. Технически такое весьма трудноосуществимо, и поэтому намного удобнее пользоваться лишь тремя полностью положительными кривыми, прибегая с целью получения корректных сигналов к методу *матрицирования*.

---

[1] Под «высокоточным» здесь подразумевается то, что стимулы всех элементов репродукции будут иметь те же трехстимульные значения и абсолютные фотометрические яркости, что и стимулы объектов оригинальной сцены. Разговор о том, является ли удовлетворение данному требованию *желательным*, пойдет в 11-й главе.

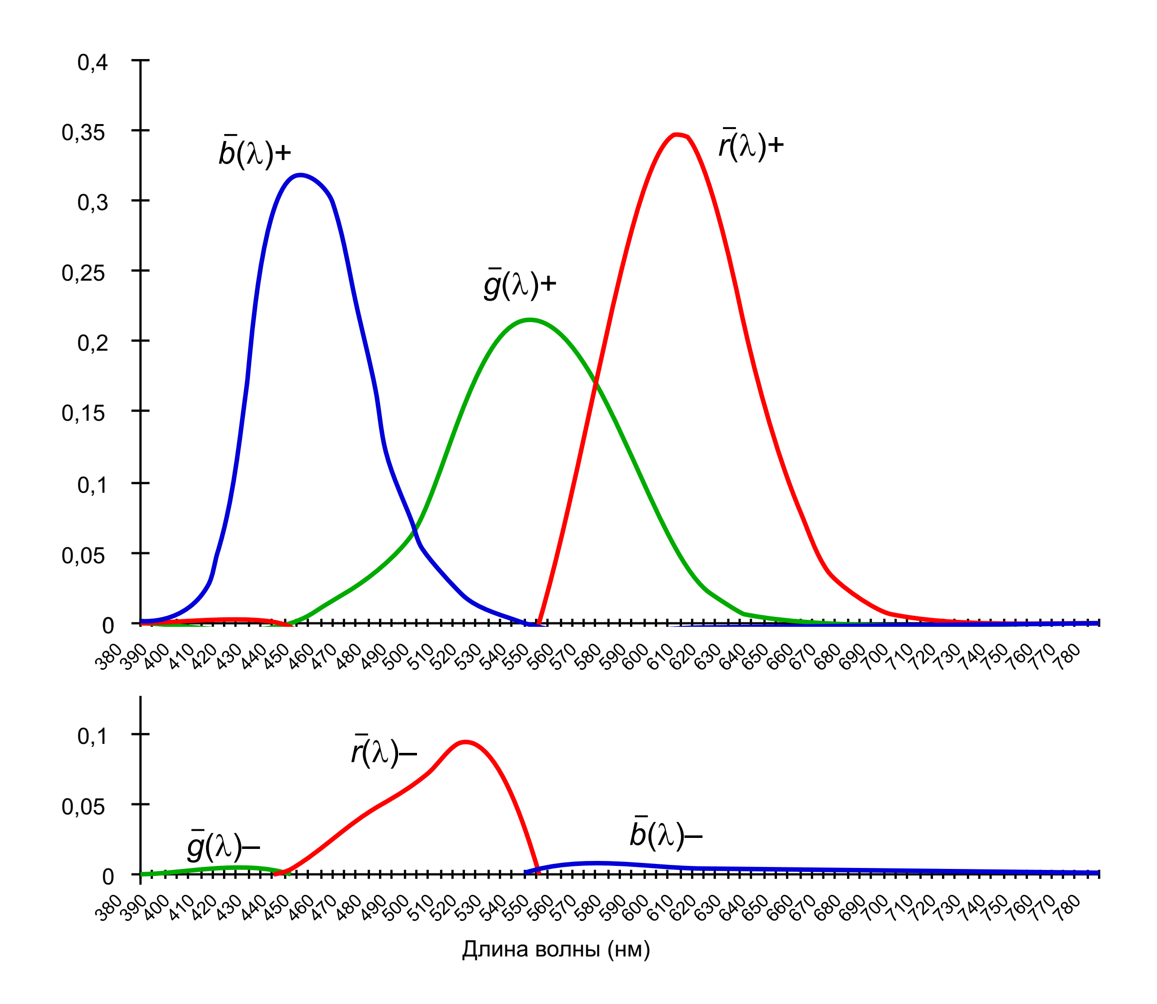


Рис. 7.5 Положительные (сверху) и отрицательные (снизу) участки трихроматических функций зрительной системы, показанных на рис. 7.4.

Если в трихроматическую кривую зрительной системы человека по красному уравнивающему стимулу добавить небольшие доли «зеленой» и «синей кривых», можно получить полностью положительную кривую. Когда сигнал идет от сенсора, имеющего именно такую (т.е. полностью положительную) чувствительность, то после вычитания из этого сигнала соответствующих долей «синего» и «зеленого» сигналов результирующий сигнал будет целиком основан на истинной трихроматической кривой по красному уравнивающему стимулу.

Когда данный метод используется при получении сигналов, основанных на трихроматических кривых зрительной системы, для корректного вычитания соответствующих долей задействуются одновременно три уравнения (решением которых, разумеется, является матрица). В результате можно получить телевизионную систему, имеющую кривые спектральной чувствительности в точности соответствующие кривым рис. 7.4 (подробнее см. раздел 19.12).

Если в нашем распоряжении имеется телевизионная система, располагающая такими кривыми чувствительности, а красный, зеленый и синий стимулы дисплея идентичны R-, G- и B-монохроматическим стимулам (с длинами волн соответственно 650, 530 и 460 нм) — мы целиком выполним условия Лютера —Айвса (см. выше). Допус-

тив, что условия 2 и 3 также полностью выполнены, — мы получим идеальную цветовую репродукцию (целиком копирующую как воздействия сцены на зрение наблюдателя, так и ощущения, возникающие под этими воздействиями — *Прим. пер.*)

Однако давайте рассмотрим случай сине-зеленого монохроматического стимула сцены с длиной волны 490 нм. Рис. 7.4 свидетельствует о том, что для достижения визуального соответствия понадобится определенное отрицательное количество красного уравнивающего стимула, то есть мы можем написать:

$$k(\lambda_{BG}) \equiv -R_{BG}(\mathrm{R}) + G_{BG}(\mathrm{G}) + B_{BG}(\mathrm{B})$$ [1]

Коль скоро все цветовые стимулы дисплея образуются смесью R-, G-, и B-стимулов, в которой могут присутствовать только положительные их количества, знак «минус» перед R_{BG} означает то, что данное количество стимула R должно быть добавлено к сине-зеленому стимулу, который мы хотим воспроизвести. Поскольку сине-зеленый стимул — это часть воспроизводимой сцены, то сразу после добавления к нему красного уравнивающего стимула мы неизбежно утратим его исходное цветовое воздействие и, следовательно, исходное цветовое ощущение. Становится понятным, что, хоть алгебра и уверяет нас в точности трихроматического цветовоспроизведения, фактически всякий раз, когда электронные сигналы указывают на необходимость отрицательного количества одного или нескольких стимулов из уравнивающей тройки, воспроизведение становится недостоверным (понятно, что данный дефект проявляет себя только тогда, когда финальные сигналы требуют отрицательных значений). Цветовые стимулы оригинальной сцены, разумеется, могут содержать в себе свет сине-зеленой части спектра, но точно воспроизведены они будут лишь при условии, что содержат свет и других его частей, то есть свет, приводящий R-компонент стимула сцены либо к нолю, либо к любому положительному значению.

Сказанное выше означает, что если, к примеру, цветовой стимул состоит из смеси света сине-зеленой и желто-зеленой частей спектра, то мы можем записать:

$$k_1(\lambda_{BG}) \equiv -R_{BG}(\mathrm{R}) + G_{BG}(\mathrm{G}) + B_{BG}(\mathrm{B})$$

$$k_2(\lambda_{YG}) \equiv -R_{YG}(\mathrm{R}) + G_{YG}(\mathrm{G}) - B_{YG}(\mathrm{B})$$ [2]

$$k_1(\lambda_{BG}) + k_2(\lambda_{YG}) \equiv (R_{YG} - R_{BG})(\mathrm{R}) + (G_{BG} + G_{YG})(\mathrm{G}) + (B_{BG} - B_{YG})(\mathrm{B})$$

При условии, что $R_{YG} - R_{BG}$ и $B_{BG} - B_{YG}$ положительны, данная смесь будет воспроизведена исключительно точно, несмотря на то, что каждая из частей по отдельности невоспроизводима.

Следовательно, мы можем говорить, что данная телевизионная система может корректно воспроизвести все цветовые стимулы, за исключением тех высокочистых стимулов, которые нельзя уравнять положительными количествами воспроизводящих стимулов RGB.

---

[1] Подстрочный индекс «BG» означает «blue-green» — сине-зеленый. — *Прим. пер.*

[2] Подстрочный индекс «YG» означает «yellow-green» — желто-зеленый. — *Прим. пер.*

7.5 ТРЕУГОЛЬНИК ЦВЕТНОСТЕЙ

Решение обсуждавшихся проблем существенно упрощается при помощи т.н. *треугольника цветностей*, о котором говорят как о своего рода цветовой карте, на которой все цвета системно представлены в виде точек внутри этого треугольника.

Если взять три неких уравнивающих стимула R, G и B, которые могут быть все теми же монохроматическими стимулами с длинами волн соответственно 650, 530 и 460 нм, и уравнять с их помощью некий цветовой стимул, то этот стимул можно системно связать со всеми остальными возможными цветовыми стимулами. Таким образом, уравнение:

$$k(\mathrm{C}) \equiv R_{\mathrm{C}}(\mathrm{R}) + G_{\mathrm{C}}(\mathrm{G}) + B_{\mathrm{C}}(\mathrm{B})$$

представляет k-единиц С-стимула. С этого момента множитель k стимула С может рассматриваться нами как физическая или фотометрическая величина, измеренная, к примеру, в энергетических единицах (таких, как ватты на квадратный метр в единице телесного угла) или в фотометрических единицах (таких, как канделы на метр квадратный или же, для пропускающих и отражающих объектов, — как коэффициент яркости).

Цветовое ощущение от стимула (красное или желтое, интенсивное или блеклое и т.п.) зависит, по большей части, от отношения между величинами R_{C}, G_{C} и B_{C}, и поэтому k принято относить к сумме этих трех величин:

$$\frac{k}{R_{\mathrm{C}} + G_{\mathrm{C}} + B_{\mathrm{C}}}(\mathrm{C}) \equiv r(\mathrm{R}) + g(\mathrm{G}) + b(\mathrm{B}),$$

где

$$r = R_C / (R_{\mathrm{C}} + G_{\mathrm{C}} + B_{\mathrm{C}})$$
$$g = G_C / (R_{\mathrm{C}} + G_{\mathrm{C}} + B_{\mathrm{C}})$$
$$b = B_C / (R_{\mathrm{C}} + G_{\mathrm{C}} + B_{\mathrm{C}})$$

Поскольку количество С-стимула можно описать отдельно, мы можем ограничиться знаком пропорциональности:

$$(C) \propto r(\mathrm{R}) + g(\mathrm{G}) + b(\mathrm{B})$$

Величины r, g и b называются *координатами цветности* (являясь координатами хроматического *воздействия* стимула на орган зрения — *Прим. пер.*). Понятно, что сумма $r + g + b$ всегда равна единице, и, если r и g известны, то b можно вычислить по формуле:

$$b = 1 - r - g$$

Теперь мы можем построить графики r и g и получить т.н. *диаграмму цветностей*, на которой будут представлены все возможные цветовые стимулы (рис. 7.6): величины g расположены по оси ординат, а величины r по оси абсцисс. Кривая линия диаграммы представляет собой т.н. *локус монохроматических стимулов*, а точка W — тот конкретный белый, что был использован при позиционировании единицы по каждому

уравнивающему стимулу. Таким образом, уравнивающие стимулы и белый стимул (W) будут иметь следующие координаты по r- и g-осям:

(R)	$r = 1$	$g = 0$
(G)	$r = 0$	$g = 1$
(B)	$r = 0$	$g = 0$
(W)	$r = 0.333$	$g = 0.333$

и, следовательно, располагаться в углах и в центре показанного треугольника.

7.6 ЗАКОН ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ

Предположим, имеются два цветовых стимула (C_1 и C_2) с известными позициями в треугольнике цветностей. Важно знать, где будет расположена точка C_3, представляющая смесь таких-то количеств C_1 и C_2. Когда C_1 и C_2 записаны как:

$$(C_1) \propto r_1(R) + g_1(G) + b_1(B), \text{ где } r_1 + g_1 + b_1 = 1$$

$$(C_2) \propto r_2(R) + g_2(G) + b_2(B), \text{ где } r_2 + g_2 + b_2 = 1,$$

а доли стимулов C_1 и C_2 в смеси равны m_1- и m_2-единиц соответственно, то далее ход рассуждений можно построить следующим образом: коль скоро m_1 и m_2 обычно даются в фотометрических единицах (как правило, в единицах яркости), следовательно, нам нужно знать фотометрические количества воспроизводящих RGB-стимулов (к примеру, в канделах на метр квадратный); эти значения не обязаны быть равны колориметрическим количествам RGB-стимулов — напротив, они чаще всего будут отличаться от них, поскольку, напомним, единицы воспроизводящих стимулов определены исходя из того, что равновеликая смесь последних уравнивает некий конкретный белый стимул.

Итак, пусть три фотометрических значения яркости будут обозначены как L_R, L_G и L_B. По стимулу C_1, измеренному в фотометрических единицах, мы можем записать:

$$L_1(C_1) \equiv r_1(R) + g_1(G) + b_1(B),$$

где $L_1 = L_R r_1 + L_G g_1 + L_B b_1$. Следовательно, одна фотометрическая единица стимула C_1 будет представлена уравнением:

$$1.0(C_1) \equiv \frac{r_1}{L_1}(R) + \frac{g_1}{L_1}(G) + \frac{b_1}{L_1}(B),$$

а m_1 фотометрических единиц соответственно:

$$m_1(C_1) \equiv \frac{m_1}{L_1} r_1(R) + \frac{m_1}{L_1} g_1(G) + \frac{m_1}{L_1} b_1(B)$$

Аналогично m_2 фотометрических единиц стимула C_2 будут представлены как:

$$m_2(\mathrm{C}_2) \equiv \frac{m_2}{L_2} r_2(\mathrm{R}) + \frac{m_2}{L_2} g_2(\mathrm{G}) + \frac{m_2}{L_2} b_2(\mathrm{B}),$$

где $L_2 = L_\mathrm{R} r_2 + L_\mathrm{G} g_2 + L_\mathrm{B} b_2$. Таким образом, смесь стимулов можно выразить как:

$$m_1(\mathrm{C}_1) + m_2(\mathrm{C}_2) \equiv \left(\frac{m_1}{L_1} r_1 + \frac{m_2}{L_2} r_2\right)(\mathrm{R}) + \left(\frac{m_1}{L_1} g_1 + \frac{m_2}{L_2} g_2\right)(\mathrm{G}) + \left(\frac{m_1}{L_1} b_1 + \frac{m_2}{L_2} b_2\right)(\mathrm{B})$$

Новые значения r и g получены делением данного уравнения на сумму коэффициентов (R), (G) и (B), выраженную через $m_1 / L_1 + m_2 / L_2$. Следовательно, получаем:

$$(C_3) \propto r_3(\mathrm{R}) + g_3(\mathrm{G}) + b_3(\mathrm{B}),$$

где:

$$r_3 = \left(\frac{m_1}{L_1} r_1 + \frac{m_2}{L_2} r_2\right) \Big/ \left(\frac{m_1}{L_1} + \frac{m_2}{L_2}\right)$$

и аналогичные выражения для g_3 и b_3. Геометрическая интерпретация данной формулы очень проста: C_3 всегда лежит на линии, соединяющей C_1 и C_2, и делит ее по обратной пропорции (рис. 7.6):

$$\frac{m_2}{L_2} \Big/ \frac{m_1}{L_1}$$

Мы видим, что C_3 фактически является центром тяжести весов m_1/L_1 (приходящимся на C_1) и m_2/L_2 (приходящимся на C_2), и, следовательно, $\mathrm{C}_1\mathrm{C}_3 / \mathrm{C}_2\mathrm{C}_3 = (m_2 / L_2)/(m_1 / L_1)$. Данное правило — правило смешения стимулов — часто именуют *законом центра тяжести*.

Сказанное выше находит отражение в треугольнике цветностей:

— во-первых, коль скоро спектральный локус искривлен по всей своей протяженности, то позиции цветностей всех смесей монохроматических стимулов и, следовательно, позиции цветностей смесей всех остальных стимулов должны лежать внутри спектрального локуса (или на нем), но никогда вне его. Таким образом, соединив два конца спектрального локуса прямой линией, мы замкнем область, содержащую цветности всех потенциально возможных цветовых стимулов. Точки, лежащие вне данной области, будут иметь одно отрицательное значение из трех, причем большее, чем того требует цветовое уравнивание;

— во-вторых, когда к какому-либо монохроматическому стимулу постепенно добавляется белый свет, позиция точки, представляющей цветность результирующей смеси, плавно смещается по прямой линии со спектрального локуса в направлении точки цветности белого стимула («белой точки»), проходя при этом через точки стимулов промежуточных цветностей. Таким образом, в треугольнике цветностей прямая линия, соединяющая «белую точку» с каким-либо монохроматическим стимулом, представляет цветности стимулов постоянной доминирующей длиной волны[1], но с

[1] MacAdam с коллегами (1950, 1951) показал, что данная линия представляет стимулы лишь с приблизительно постоянным цветовым тоном.

различной колориметрической чистотой: более колориметрически чистые стимулы лежат ближе к спектральному локусу (или на нем), менее чистые — ближе к точке белого стимула («белой точке»), промежуточные — между этими позициями.

Цветовые тона стимулов, позиции цветностей которых расположены на спектральном локусе и согласуются с рис. 1.1 (а), отмечены на рис. 7.6. Цветности чистейших малиновых и пурпурных стимулов лежат на линии, соединяющей концы спектрального локуса.

Кстати говоря, принцип треугольника цветностей помогает лучше понимать недостатки цветного телевидения: все цветовые стимулы, представленные точками, лежащими внутри RGB-треугольника, воспроизводятся очень точно, но стимулы, точки которых лежат вне треугольника и требуют, чтобы одно из трехстимульных значений было отрицательным, нельзя воспроизвести корректно. Проще говоря: трихроматическое цветовоспроизведение ограничено краями треугольника цветностей, а самым серьезным ограничением является случай сине-зеленых стимулов высокой колориметрической чистоты.

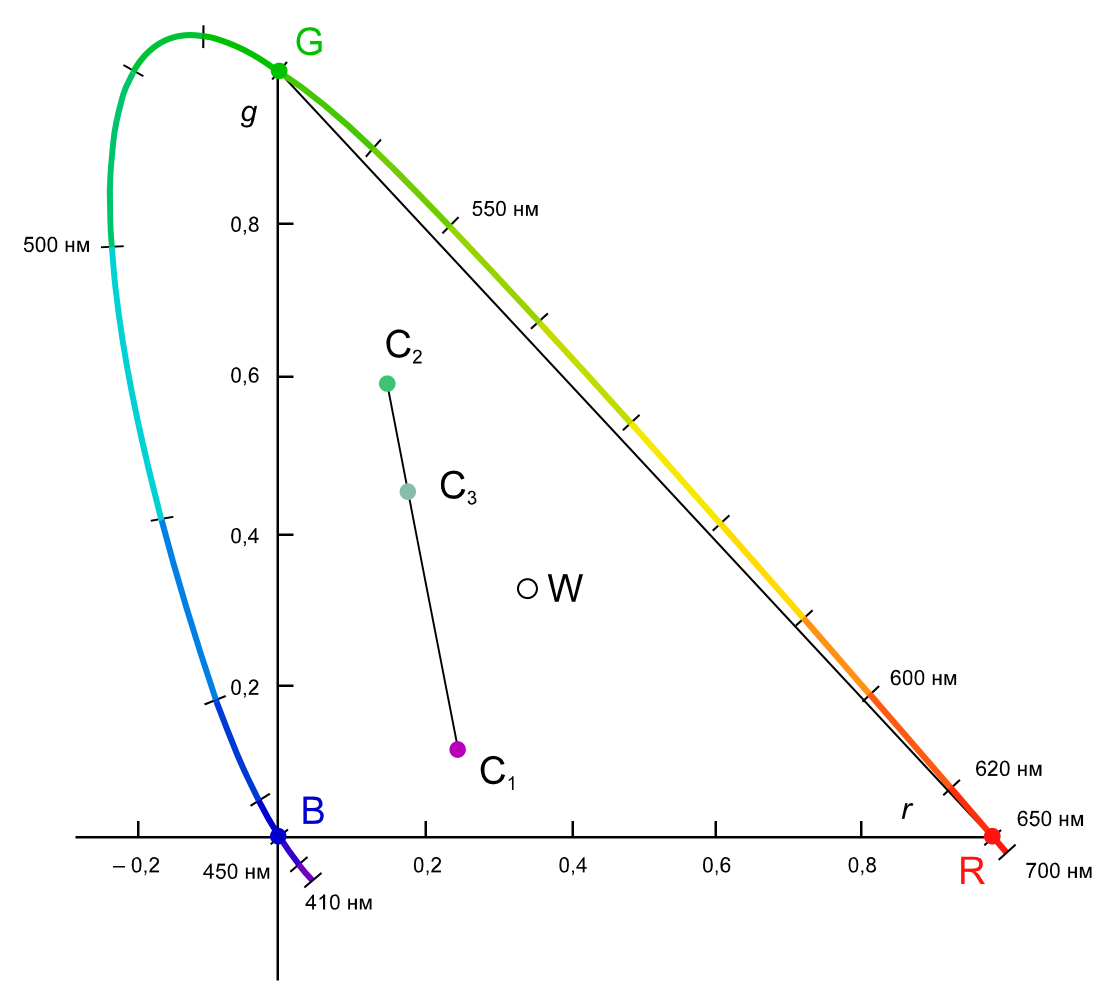


Рис. 7.6 Треугольник цветностей уравнивающих стимулов с длинами волн 650, 530 и 460 нм, демонстрирующий локус монохроматических стимулов и белую точку (W). Единицы подобраны так, что уравнивание равноэнергетического источника S_E требует равных количеств RGB-стимулов.

7.7 ПРОЧИЕ ТРЕУГОЛЬНИКИ ЦВЕТНОСТЕЙ

Когда вместо монохроматических стимулов с длинами волн 650, 530 и 460 нм используются три других уравнивающих монохроматических стимула (R_O, G_O и B_O)[1], мы получаем треугольник цветностей, аналогичный тому, что показан на рис. 7.6, но при этом позиции углов (представляющих стимулы R_O, G_O и B_O), а также всех остальных цветовых стимулов оказываются смещенными.

На рис. 7.7 показан треугольник уравнивающих монохроматических стимулов R_O, G_O и B_O с длинами волн соответственно 700, 546.1 и 435.8 нм, а на рис. 7.8 — уравнивающих полосчатых стимулов R_S, G_S и B_S[2] с длинами волн от 700 до 580 нм, от 580 до 490 нм и от 490 до 400 нм, полученных при помощи вольфрамовой лампы накаливания при цветовой температуре 2856 K[3].

Отметим, что весьма желательно, по возможности, выбирать такой треугольник цветностей, у которого равные расстояния в любом его участке будут представлять равные цветовые отличия. Треугольника, который идеально удовлетворял бы данному требованию, не существует, но более или менее равномерный по данному критерию показан на рис. 7.9. Очевидно, что от треугольников, представленных на рис. 7.6, 7.7 и 7.8, он отличен тем, что вершины его (U', V' и W') лежат за границами спектрального локуса. Полное описание и толкование такого треугольника будет дано в следующих главах, здесь же следует отметить лишь то, что свойства его такие же, как и у прочих треугольников: точка, представляющая смесь любых двух стимулов, лежит на линии, соединяющей точки, которые представляют компоненты смеси, и тоже делит эту линию на обратное отношение $(m_2 / L_2)/(m_1 / L_1)$.

7.8 АДДИТИВНОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Благодаря принципу треугольника цветностей, недостатки аддитивного цветовоспроизведения становятся еще более очевидными: мы уже говорили о том, что в системе, кривые спектральной чувствительности которой вынужденно имеют отрицательные участки, одно из ограничений проявляет себя тем, что на край этого треугольника будут смещены стимулы, точки которых лежат за границами треугольника, образованного точками уравнивающих (воспроизводящих) стимулов. Следовательно, весьма желательно, чтобы треугольник цветностей данной цветовоспроизводящей системы захватывал как можно большую область точек, то есть как можно большее число позиций возможных цветовых стимулов.

На рис. 7.10 треугольник R_T, G_T, B_T[4] (монохроматические стимулы с длинами волн примерно 700, 525 и 450 нм) демонстрирует лучшее, чего можно достичь. Сразу отметим, что если точку уравнивающего стимула G_T слегка сместить в сторону коротких длин волн, то воспроизведение чистых сине-зеленых стимулов, несомненно, улучшится, однако в ущерб чистым желтым. Коль скоро последних в природе гораздо больше, чем первых, — показанная позиция G_T остается весьма близкой к оптимальной.

---

1 Подстрочный индекс «O» означает «other» — другой. — *Прим. пер.*
2 Подстрочный индекс «S» означает «subtractive» — полученный вычитанием. — *Прим. пер.*
3 Термин «цветовая температура» определен в разделе 10.2.
4 Подстрочный индекс «T» означает «theoretical» — теоретический. — *Прим. пер.*

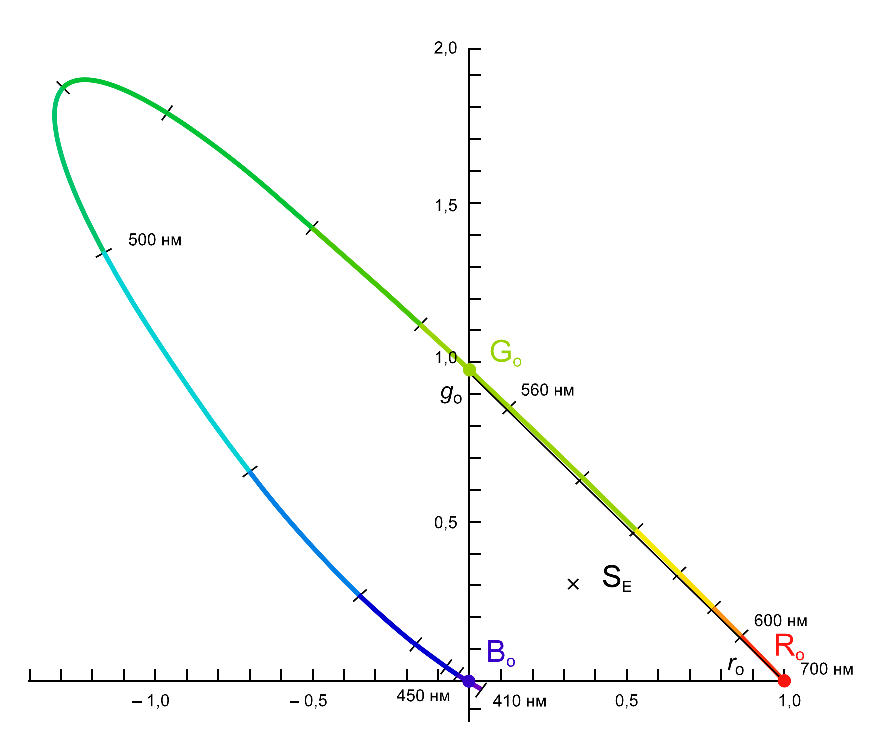


Рис. 7.7 Треугольник цветностей уравнивающих стимулов с длинами волн 700,0 546,1 и 435,8 нм. Единицы подобраны так, что для уравнивания равноэнергетического источника S_E необходимы равные количества RGB-стимулов.

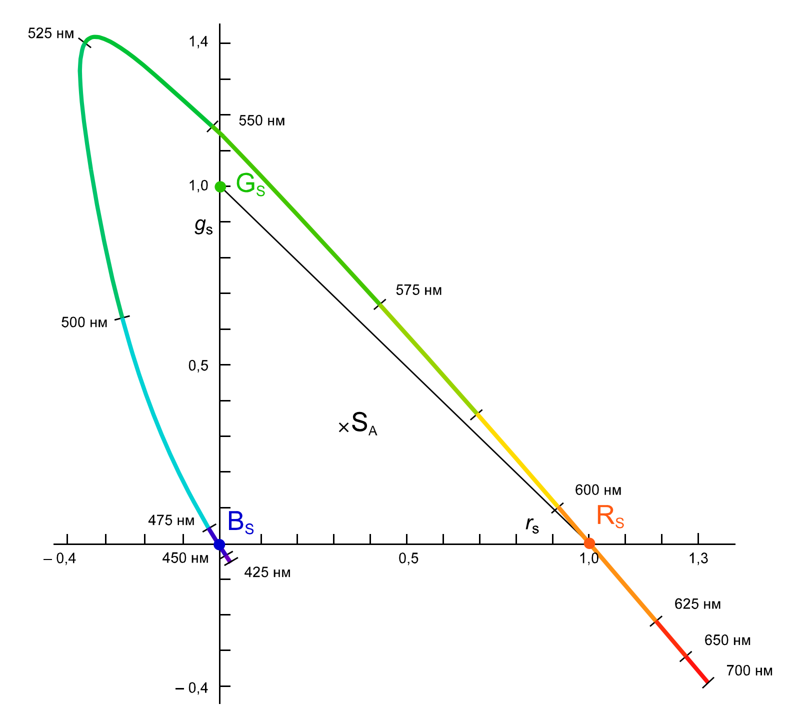


Рис. 7.8 Треугольник цветностей уравнивающих стимулов, полученных путем фильтрации трех спектральных полос из света лампы накаливания с цветовой температурой 2856 K (S_A). Состав полос: от 700 до 580 нм (R_S); от 580 до 490 нм (G_S); от 490 до 400 нм (B_S). Единицы подобраны так, что для визуального уравнивания света лампы (S_A) необходимы равные количества RGB-стимулов.

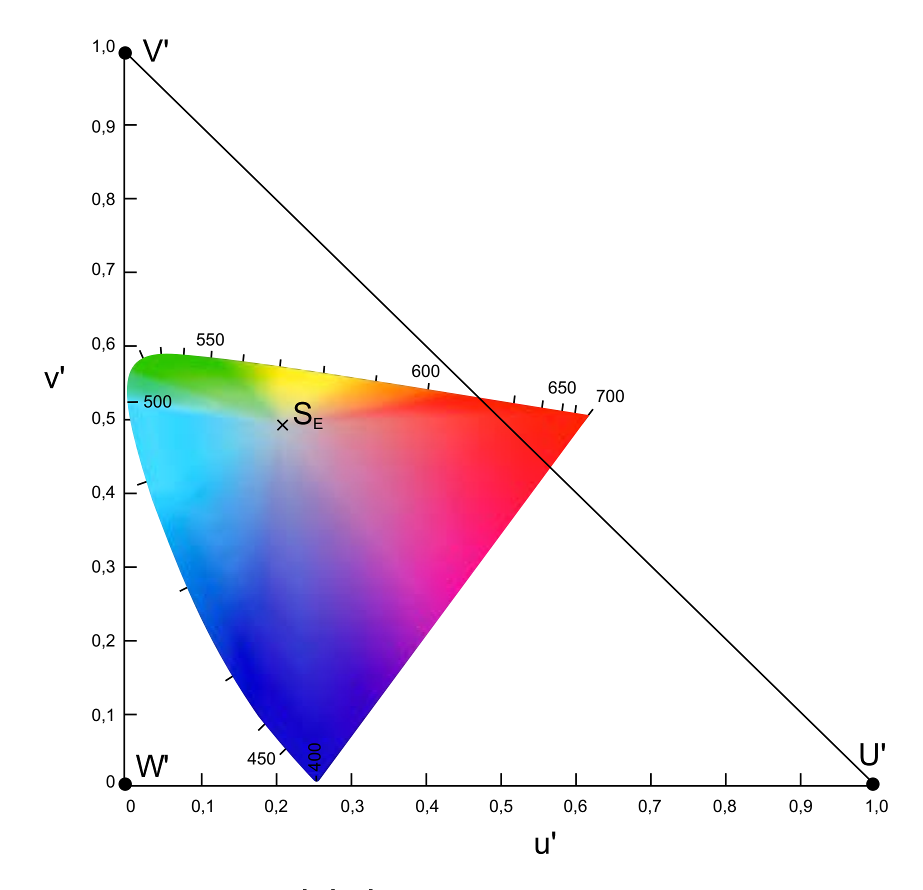


Рис. 7.9 Треугольник цветностей U'V'W', в котором точки всех возможных цветовых стимулов более или менее равномерно распределены в области, ограниченной спектральным локусом.

7.8.1 Охваты цветностей аддитивных и субтрактивных систем

Далее. Чистые монохроматические лучи высокой интенсивности получить всегда трудно, поэтому большинство аддитивных цветофотографических систем для генерации воспроизводящих стимулов используют красный, зеленый и синий фильтры. Эти фильтры изготавливаются на основе стекла или желатина, а их кривая пропускания подобна той, что показана на рис. 7.11 (а). Через фильтры пропускается свет лампы накаливания, спектральное распределение энергии которой подобное показанному на рис. 7.11 (b). Позиции результирующих уравнивающих стимулов отмечены символами R_P, G_P, B_P[1], и хорошо видно, что ограничения по сине-зеленому и малиновому направлениям выражены еще больше, чем в случае стимулов монохроматических.

В телевизионных системах красный в целом хуже, чем R_P, зеленый — слегка хуже, чем G_P, а синий близок к B_P (см. рис. 7.17) (о стимулах R_S, G_S и B_S речь идет также в разделе 9.2).

Как уже было сказано, в цветной фотографии кривые спектральных чувствительностей с участками отрицательных значений реализовать очень сложно, но, к счастью, на практике этим обстоятельством можно пренебречь; при этом каждый набор воспроизводящих стимулов будет иметь слегка разные трихроматические кривые[2], и

[1] Подстрочный индекс «P» означает «photographic» — фотографический. — *Прим. пер.*

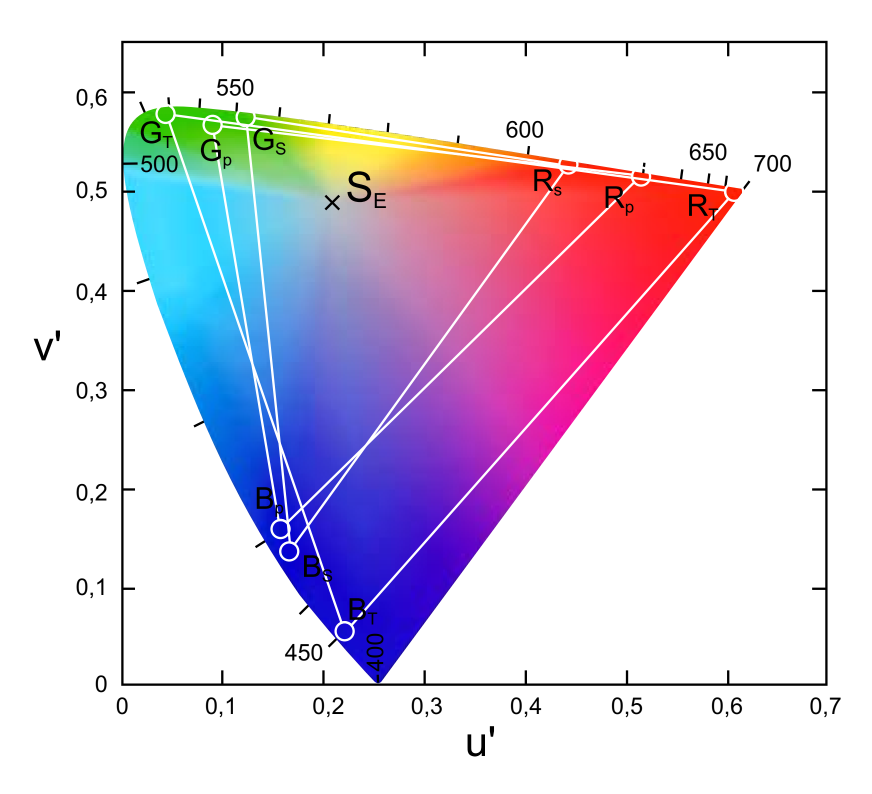


Рис. 7.10 Три различных цветовых охвата при использовании различных уравнивающих стимулов. $R_T G_T B_T$ —теоретические аддитивные монохроматические стимулы с длинами волн соответственно 700, 525 и 400 нм; $R_P G_P B_P$ —практически воспроизводимые аддитивные стимулы, полученные пропусканием света лампы накаливания (спектральное распределение на рис. 7.11 (b)) через фильтры со спектральными коэффициентами пропускания, показанными на рис. 7.11 (a). $R_S B_S G_S$ —«теоретические субтрактивные» стимулы (рис. 7.8).

понятно, что чем дальше спектральный локус лежит от границ треугольника цветностей, тем более в этих кривых выражены участки отрицательных значений, тем более выражены они в кривых спектральной чувствительности (которые должны быть идентичны трихроматическим кривым зрительной системы) и тем большие погрешности цветовоспроизведения будут возникать при игнорировании этого обстоятельства. Таким образом, в цветной фотографии выбор оптимальной тройки воспроизводящих стимулов очень важен.

Отметим, что малый размер треугольника цветностей воспроизводящих стимулов не только ограничивает хроматический охват системы, но также усугубляет последствия игнорирования участков отрицательных значений в трихроматических кривых зрительной системы человека. Отсутствие отрицательных участков в кривых спектральной чувствительности фотоматериалов может привести к тому, что все цветовые стимулы будут воспроизведены некорректно, поскольку один из трех уравнивающих стимулов отрицателен по монохроматическим стимулам почти всего спектрального диапазона. Исключение составляют оригинальные стимулы красной, оранжевой и желтой части видимого спектра, которые очень хорошо воспроизводятся трихроматическим способом.

Наконец отметим, что значимость различных видов отклонения кривых спек-

---

[2] Но неизбежно являющиеся при этом линейной комбинацией друг друга, поскольку в основе кривых лежит физиология человека. — *Прим. пер.*

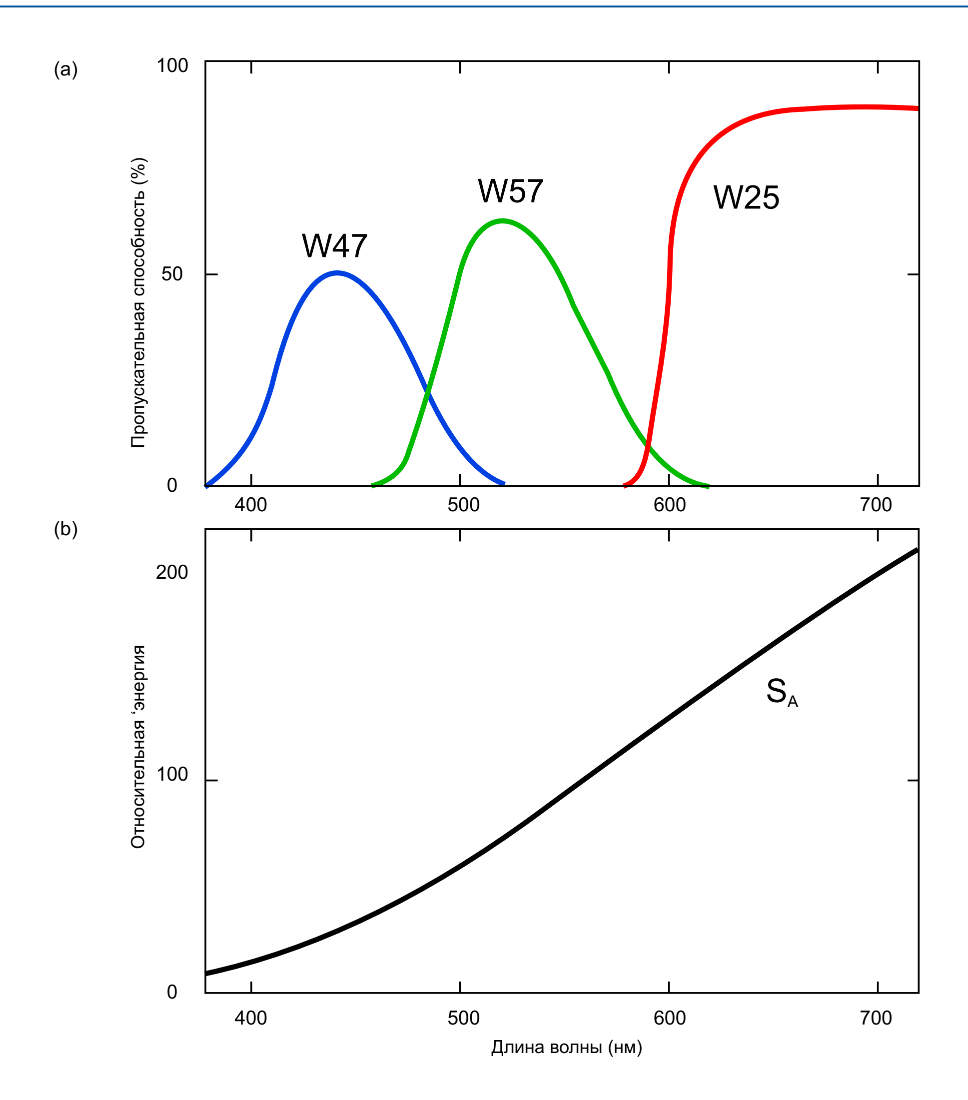


Рис. 7.11 (a) — кривые спектральных коэффициентов пропускания фильтров, обычно используемых в цветной аддитивной фотографии для получения воспроизводящих стимулов; (b) — кривая спектрального распределения энергии вольфрамовой лампы накаливания с цветовой температурой 2856 К (S_A), обычно используемой при подсветке этих фильтров.

тральной чувствительности от теоретических трихроматических кривых зрительной системы человека стала предметом ряда серьезных исследований (Evans, Hanson и Brewer, 1953 — см. гл. 13; MacAdam, 1953; Neugebauer, 1956; Gosling и Yule, 1960 — см. раздел 9.5).

7.9 КОМПРОМИСС АЙВСА — ЭБНЕЯ — ЮЛА

В пятой главе мы показали, что в реальной жизни цветовые стимулы меняются за счет большей или меньшей добавки белого света ко всем цветовым стимулам (например, благодаря атмосферной дымке). По этой причине погрешности цветовоспроизведения, которые эквивалентны такой добавке (т.е. небольшой порции белого света, подмешанной ко всем цветовым стимулам) не столь заметны.

На рис. 7.12 точки P_1, P_2 и P_3 — это вершины треугольника, включающего в себя все

реальные цветовые стимулы; если бы уравнивающие стимулы таких характеристик были доступными (что, конечно, невозможно) все реальные цветовые стимулы были бы уравнены положительными трихроматическими смесями (т.е. в трихроматических кривых зрительной системы человека не было бы отрицательных участков). Рассчитать, какими были бы тогда трихроматические кривые по этим стимулам, и подобрать соответствующие положительные кривые спектральной чувствительности цветорепродукционной системы было бы очень просто.

Когда в качестве воспроизводящих мы выберем три стимула Q_1, Q_2 и Q_3, лежащих на линиях, соединяющих P_1, P_2 и P_3 с точкой S (представляющей белый стимул), то Q_1, Q_2 и Q_3 можно будет рассматривать как смесь стимулов P_1, P_2 и P_3 с белым стимулом S. Следовательно, при использовании стимулов Q_1, Q_2 и Q_3 в качестве воспроизводящих (вместо P_1, P_2 и P_3) к изображению сцены лишь добавится белый свет и, значит, не возникнет заметных погрешностей: доминирующие длины волн останутся неизменными, а колориметрическая чистота будет равномерно понижена. Такой прием широко известен как *компромисс Айвса — Эбнея — Юла* (см. MacAdam, 1938, стр. 415).

Цветорепродукционная система, в которой кривые спектральной чувствительности камеры — это трихроматические кривые зрительной системы человека по «стимулам» P_1, P_2 и P_3 (рис. 7.13), а воспроизводящие стимулы — это Q_1, Q_2 и Q_3, даст погрешности лишь в рамках добавки некоторого количества белого света ко всем воспроизводимым стимулам (хотя черный будет по-прежнему получаем за счет нулевых интенсивностей стимулов Q_1, Q_2 и Q_3). Погрешности проявят себя в смещении точек результирующих стимулов внутрь треугольника цветностей и в направлении точки белого стимула (рис. 7.14). Поскольку такое смещение свойственно переменчивым стимулам реальных сцен, — оно вполне приемлемо.

7.9.1 Компенсация потерь

Когда наряду с компромиссом Айвса — Эбнея — Юла имеется возможность поднять гамма тонопередачи системы, можно восстановить часть утраченной чистоты цвета элементов репродукции. На рис. 7.15 показано, что подъем гамма тонопередачи от 1.0 до 1.5 повышает чистоту цвета стимулов примерно до исходного уровня, показанного на рис. 7.14.

Как было сказано в 6-й главе, гамма систем, ориентированных на просмотр изображений в темном окружении, равна 1.5, дабы тоновоспроизведение было корректным. Коль скоро темное окружение понижает чистоту цвета стимулов, то подъем гамма в данном случае лишь приостановит это снижение, но, конечно, полностью не устранит его. При студийном освещении можно поднять гамма выше, чем того требует корректное визуальное тоновоспроизведение, и тем самым полностью вернуть чистоту цвета стимулов.

Компромисс Айвса — Эбнея — Юла также позволяет избежать погрешностей воспроизведения по доминирующей длине волны (к которым зрение весьма чувствительно и что проявляет себя в отклонениях по цветовому тону). Однако наложение «красной» и «зеленой» чувствительностей друг на друга часто приводит к снижению эффективности экспонирующего света, из-за чего «красные» и «зеленые» кривые спектральной чувствительности фактических фотографических систем и телевидения сильно разносят по оси длин волн (см. разделы 9.5 и 19.12). Последнее повышает чистоту цвета воспроизводимых стимулов, но ведет к погрешностям по доминирующей длине волны (если невозможно использование отрицательных участков).

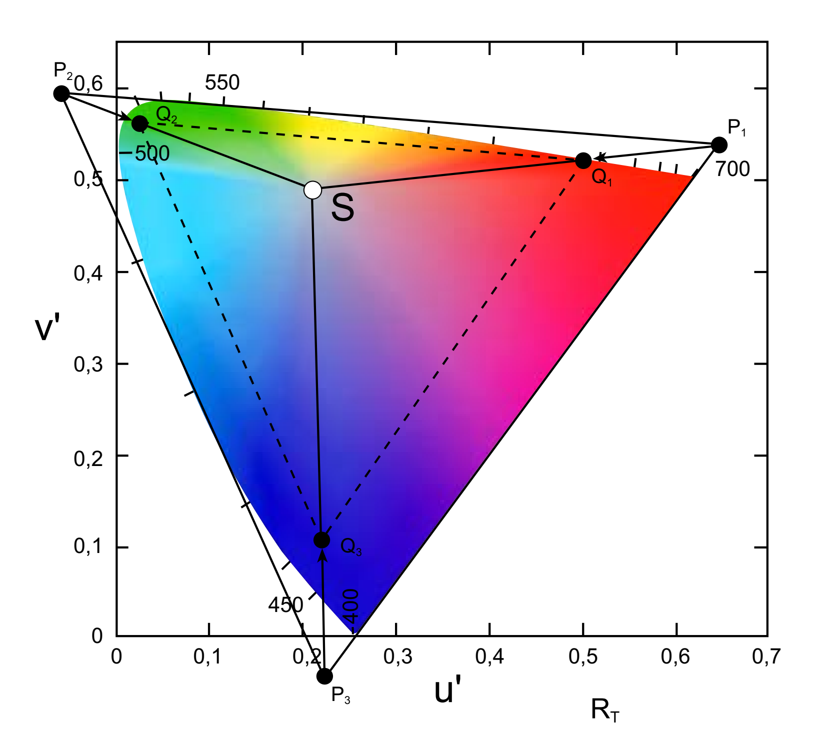


Рис. 7.12 Компромисс Айвса — Эбнея — Юла. Путем использования кривых спектральной чувствительности, согласованных со «сверхчистыми» гипотетическими стимулами P_1, P_2 и P_3, и реальных воспроизводящих стимулов Q_1, Q_2 и Q_3 — погрешности цветовоспроизведения сводятся к легкой добавке белого света.

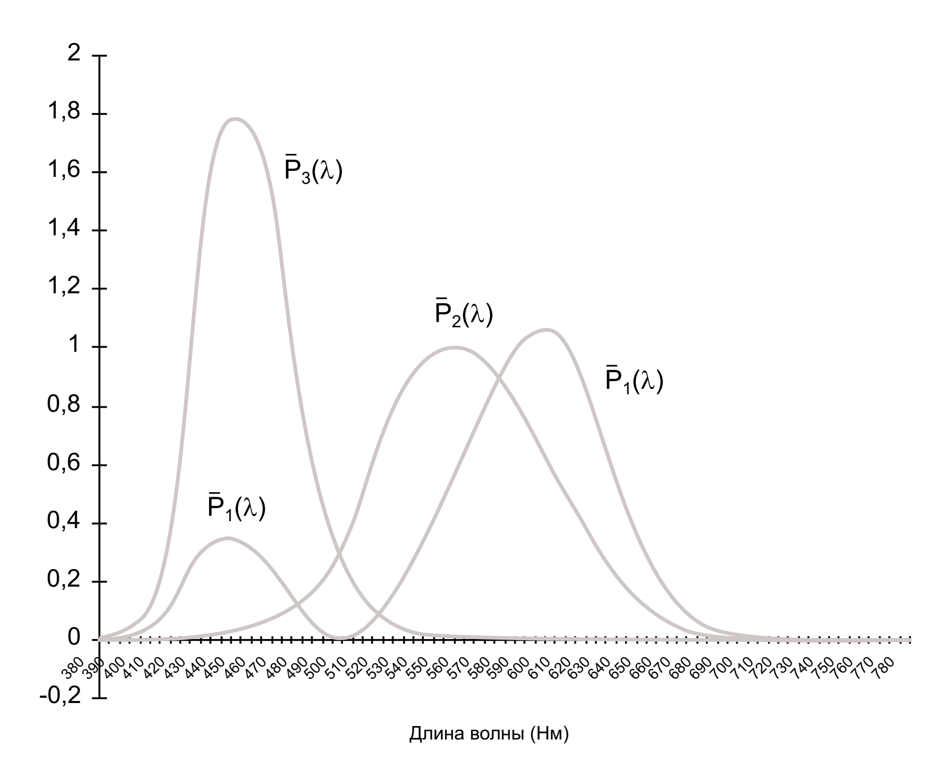


Рис. 7.13 Трихроматические кривые зрительной системы человека по гипотетическим стимулам P_1, P_2 и P_3 (рис. 7.12). Поскольку у данных кривых нет отрицательных участков, спектральный локус целиком лежит внутри треугольника $P_1P_2P_3$.

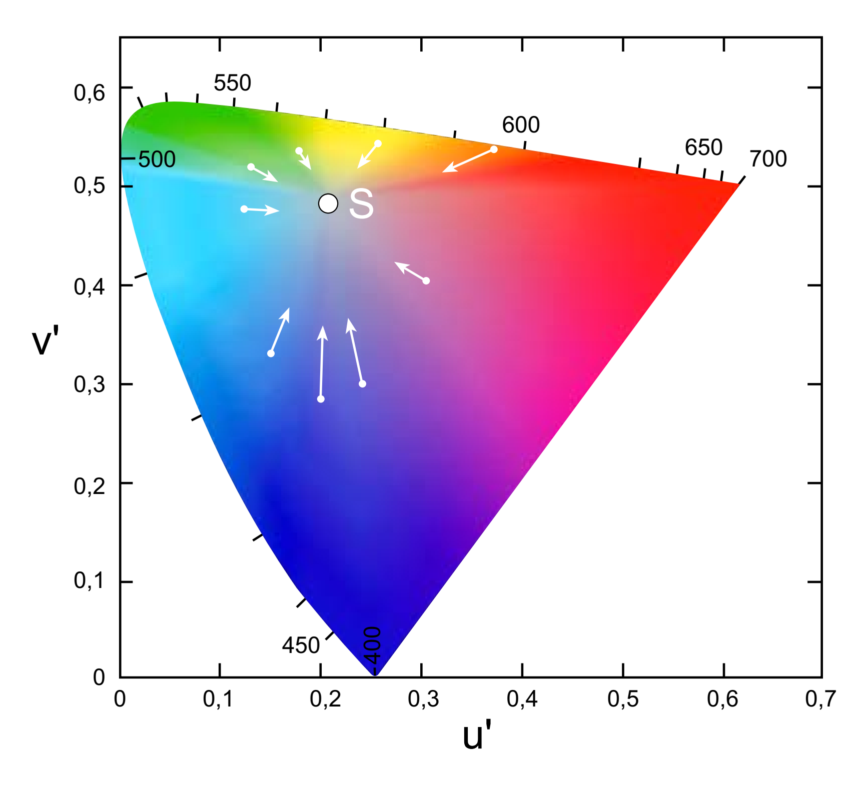


Рис. 7.14 Типичные погрешности, являющиеся следствием компромисса Айвса — Эбнея — Юла (рис. 7.12).

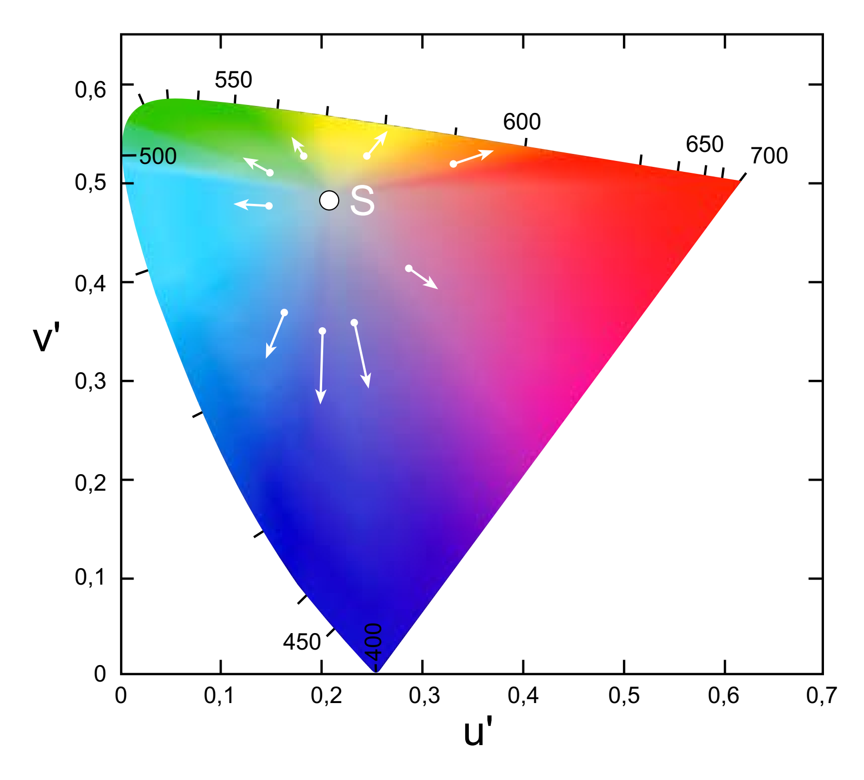


Рис. 7.15 Типичный рост чистоты цвета стимулов при повышении гамма системы от 1.0 до 1.5.

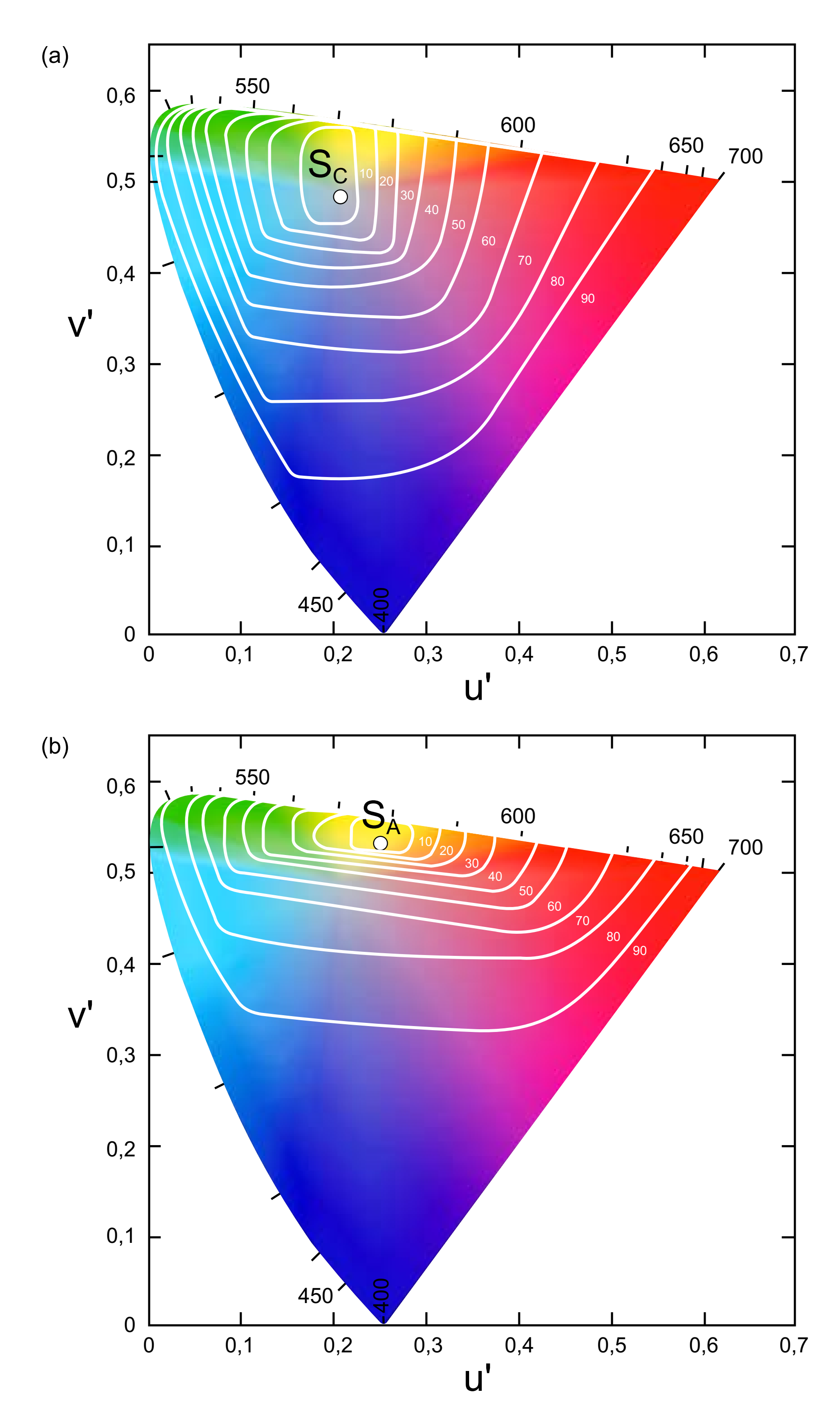


Рис. 7.16 (a) — контуры теоретических хроматических пределов цветностей воспроизводящих стимулов, полученных от нефлуоресцентных материалов, освещенных дневным светом (стандартный осветитель S_C) при разных коэффициента отражения поверхности (или пропускания); (b) — то же при свете стандартного осветителя S_A.

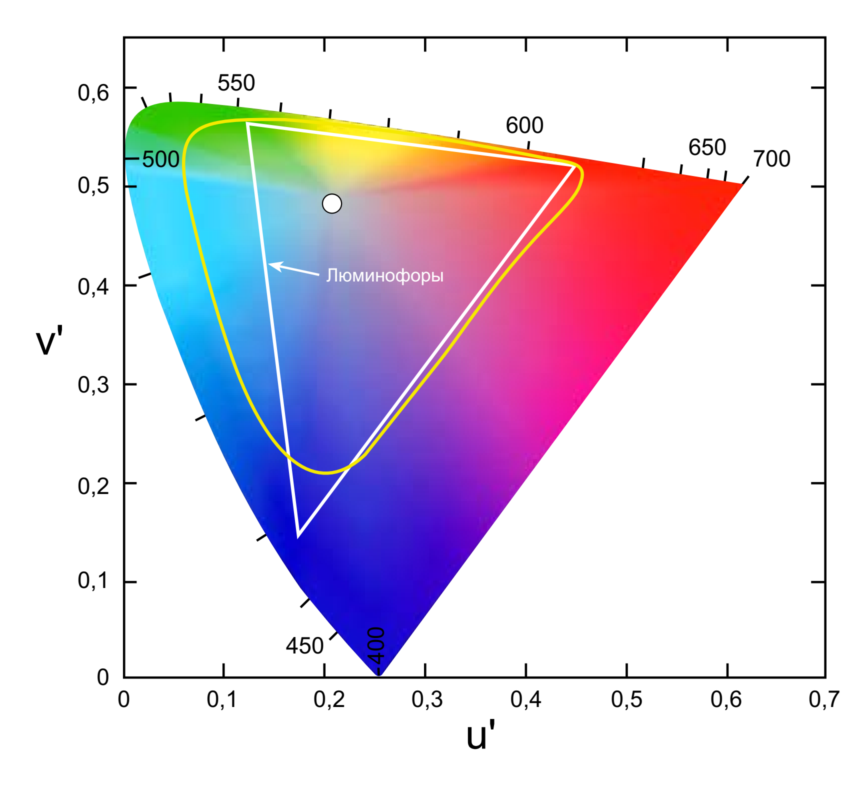


Рис. 7.17 Область, ограниченная белым контуром, представляет собой охват цветностей типичных пигментов, красок и чернил, освещенных дневным светом (Pointer, 1980); треугольник (белый контур) демонстрирует пределы цветностей стимулов, воспроизводимых люминофорами бытовых телеприемников (B.R.E.M.A., 1969; DeMarsh, 1993).

7.10 ОХВАТЫ ЦВЕТНОСТЕЙ СТИМУЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ ОТРАЖАЮЩИХ И ПРОПУСКАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

При оценке охватов цветностей стимулов, воспроизводимых системой, полезно иметь в виду, что существуют теоретические пределы цветности, которой могут достичь стимулы, полученные от нефлуоресцирующих окрашенных поверхностей или фильтров. Эти пределы изучены Мак-Адамом (MacAdam, 1933). На рис. 7.16 показаны пределы цветностей по стандартным осветителям S_C и S_A (последние определены в разделе 8.2). Данные Мак-Адама относятся к цветовым стимулам, спектральные коэффициенты яркости которых равны либо единице, либо нулю по всем длинам волн (т.н. *оптимальные цветовые стимулы*).

Реальные цветовые стимулы, полученные от нефлуоресцирующих отражающих (или пропускающих) поверхностей, ограничены по цветности еще больше, чем те, что показаны на рис. 7.16 (поскольку данные спектральные коэффициенты яркости лежат между нулем и единицей). Такие стимулы сильно ограничены по цветности за счет белого света, отраженного от поверхностного слоя (см. рис. 5.3 и 13.4), и свет этот может очень сильно снизить колориметрическую чистоту темных стимулов.

На рис. 7.17 охват цветностей типичных повседневно используемых пигментов, красок и чернил (Pointer, 1980; Wintringham, 1951) сравнивается с охватом цветностей типичных бытовых телевизоров (B.R.E.M.A., 1969; DeMarsh, 1993). Мы видим, что охваты схожи между собой за исключением легкой недостаточности телевизион-

ного охвата в сине-зеленом и пурпурном участках (что создает проблемы при воспроизведении сверхчистых зеленого, бирюзового, красного и сиреневого).

7.11 ДИХРОМАТИЧЕСКОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Если все цветовые стимулы сцены будут такими, что соответствующие им точки треугольника цветностей, выстроятся по одной линии, то станет возможным точное цветовоспроизведение с помощью дихроматической аддитивной системы: действительно, смешивая лишь красный и белый стимулы, можно получить ряд весьма интересных визуальных эффектов (Cornwell-Clyne, 1951, p.261; Land, 1959). Поскольку зрение имеет четко выраженную склонность к обесцвечиванию общего розового колорита изображения, белые участки начинают восприниматься голубыми, а «голубые» участки — розовыми.

Джадд с колл. показал, что при дихроматическом цветовоспроизведении возникают и некоторые другие эффекты, вызывающие ощущения различных цветовых тонов (Belsey, 1964; Judd, 1960; Rushton, 1961; Pearson и Rubinstein, 1970, 1971), и что дихроматическое цветовоспроизведение не зависит от контраста между двумя воспроизводящими изображениями (Wilson и Brocklebank, 1960, 1961).

Примечательным свойством дихроматического цветовоспроизведения является то, что два воспроизводящих изображения при точной взаимоприводке могут дать вполне приемлемую цветовую репродукцию некоторых предметов. Если приводка несколько нарушена, то восприятие репродукции слегка страдает, но если она совсем плохая — наблюдатель видит лишь красные, розовые и белые пятна. Из сказанного следует, что на дихроматическое цветовоспроизведение в большей степени влияет точность взаимоприводки воспроизводящих изображений, нежели общая адаптация к розовому свету (поскольку в противном случае качество не оказывало бы столь существенного влияния). Очевидно то, что когда точность приводки воспроизводящих изображений достаточна для обеспечения адекватного восприятия интересующей сцены, зрительный механизм мгновенно и в значительной степени обесцвечивает общий розовый тон и распознает объекты сцены так, будто бы они освещены обычным белым светом.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Belsey, R., J. Opt. Soc. Amer., 54, 529 (1964).

B.R.E.M.A., P.A.L. Working Party, Radio and Electronic Engineer, 38, 201 (1969).

CIE, International Lighting Vocabulary, 4th Edn., C.E.I., Geneva (1987).

Cornwell-Clyne, A., Colour Cinematography, Chapman & Hall, London, p. 261 (1951).

DeMarsh, L. SMPTE J., 102, 1095 (1993).

Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, Wiley, New York (1953).

Gosling, J.W., and Yule, J.A.C., Proc. Tech. Assoc. Graphic Arts, 12, 157 (1960).

Hardy, A.C., and Wurzburg, F.L., J. Opt. Soc. Amer., 27, 227 (1937).

Harrison, G.B., and Homer, R.G., Phot. J., 77, 706 (1937).

Hunt, R.W.G., Color Res. Appl., 2, 53 and 109 (1977).

Hunt, R.W.G., Color Res. Appl., 3, 79 (1978).

Judd, D.B., J. Opt. Soc. Amer., 50, 254 (1960).

Land, E.H., Proc. Nat. Acad. Sci., 45, 113 and 636 (1959).

MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 15, 361 (1935).

MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 28, 399 (1938).
MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 40, 589 (1950).
MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 41, 615 (1951).
MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 43, 533 (1953).
Neugebauer, H.E.J., J. Opt. Soc. Amer., 46, 821 (1956).
Newhall, S.M., J. Opt. Soc. Amer., 30, 617 (1940).
Pearson, D.E., and Rubinstein, C.B., J. Opt. Soc. Amer., 60, 1398 (1970).
Pearson, D.E., and Rubinstein, C.B., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 80, 15 (1971).
Pointer, M.R., Color Res. Appl., 5, 145 (1980).
Rushton, W.A.H., Nature, 189, 440 (1961).
Wilson, M.H., and Brocklebank, R.W., J. Phot. Sci., 8, 141 (1960).
Wilson, M.H., and Brocklebank, R.W., Contemporaty Physics, 3, 19 (1961).
Wintringham, W.T., Proc. I.R.E., 39, 1135 (1951).

8 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ И ВЫЧИСЛЕНИЯ

8.1 ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих главах вопросы цветовоспроизведения излагались в логике количественных показателей, в частности на примере треугольников цветностей. Мы убедились в том, что единственно возможного треугольника цветностей не существует, но имеется целое семейство вполне работоспособных треугольников. По этой причине, с целью эффективного сравнения данных о цветовых воздействиях и цвете, были приняты определенные международные стандарты, которые мы кратко рассмотрим в текущей главе. В ней же мы опишем некоторые методы колориметрических и цветовых вычислений, основанные на этих стандартах.

8.2 СТАНДАРТНЫЕ ОСВЕТИТЕЛИ

Как было показано в разделе 5.3, одни и те же цветовые стимулы, предъявляемые при источниках освещения с различной цветностью, могут восприниматься по-разному. Следовательно, важнейшим шагом в колориметрической спецификации зрительных стимулов является точное описание источников света.

В 1931 г. с целью упрощения описанной проблемы Международная комиссия по освещению (CIE — Commission Internationale de l`Eclairage) рекомендовала к употреблению три стандартных источника освещения (A, B, и C). Кривые спектрального распределения энергии этих источников показаны на рис. 8.1.

Стандартный CIE A-источник (S_A) представляет собой вольфрамовую лампу накаливания, действующую при цветовой температуре 2856 K[1]. Стандартные CIE-источники «B» и «C» (S_B и S_C) основаны на той же лампе, расположенной за специальными жидкостными фильтрами (см. таблицу 8.1).

S_A-источник призван воспроизводить свет раскаленной вольфрамовой нити.

S_B- источник — солнечный свет.

S_C — свет пасмурного неба (Billmeyer и Gerrity, 1983).

Несмотря на то, что S_B и S_C весьма точно представляют спектральное распределение энергии дневного света практически по всему диапазону видимого спектра, на длинах волн, меньших 400 нм, они сильно отклоняются от него (что делает их непригодными к использованию с флуоресцирующими образцами — образцами, поглощающими энергию в каком-либо диапазоне, а затем отдающими ее на более длинных волнах). Вместе с тем, поскольку все более популярными становятся флуоресцирующие краски и пигменты, позволяющие, к примеру, добиваться высочайшей белизны различных

[1] Эквивалентна 2583°C.

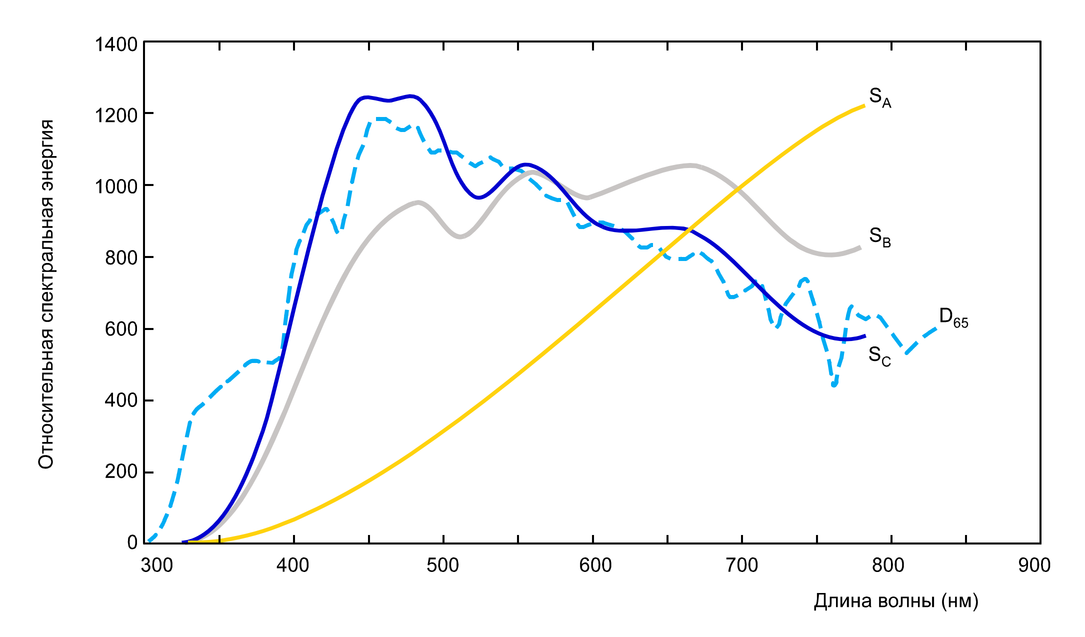


Рис. 8.1 Относительные спектральные распределения энергии стандартных CIE-осветителей A, B и C. S_A — спектральное распределение энергии света вольфрамовой лампы накаливания. S_B аппроксимирует солнечный свет в диапазоне от 400 до 700 нм, а S_C — свет пасмурного неба. Спектральное распределение энергии стандартного CIE D_{65}-осветителя, представляющего усредненный дневной свет, показано пунктирной линией, благодаря чему хорошо видна энергетическая недостаточность S_B- и S_C-осветителей на длинах волн, меньших 400 нм.

ТАБЛИЦА 8.1 Фильтры, конвертирующие A-осветитель в стандартные осветители «B» и «C». Каждый фильтр состоит из двух растворов толщиной в 1 см, заключенных в двойные сосуды из бесцветного оптического стекла

Вещество	**Количество**	
	Для S_B	**Для S_C**
Медный купорос ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)	2.452 г	3.412 г
Маннит ($C_6H_8(OH)_6$)	2.452 г	3.412 г
Пиридин (C_5H_5N)	30.0 мл	30.0 мл
Вода дистиллированная до	1000 мл	1000 мл
Шестиводный кобальт-аммоний сульфат ($CoSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$)	21.710 г	30.580 г
Медный купорос ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)	16.110 г	22.520 г
Серная кислота (уд. вес 1.835)	10.0 мл	10.0 мл
Вода дистиллированная до	1000 мл	1000 мл

В CIE-системе данные осветители выражены как:

$(S_A)\alpha 0.44758(X) + 0.40744(Y) + 0.14498(Z)$

$(S_B)\alpha 0.34842(X) + 0.35161(Y) + 0.29997(Z)$

$(S_C)\alpha 0.31006(X) + 0.31616(Y) + 0.37378(Z)$

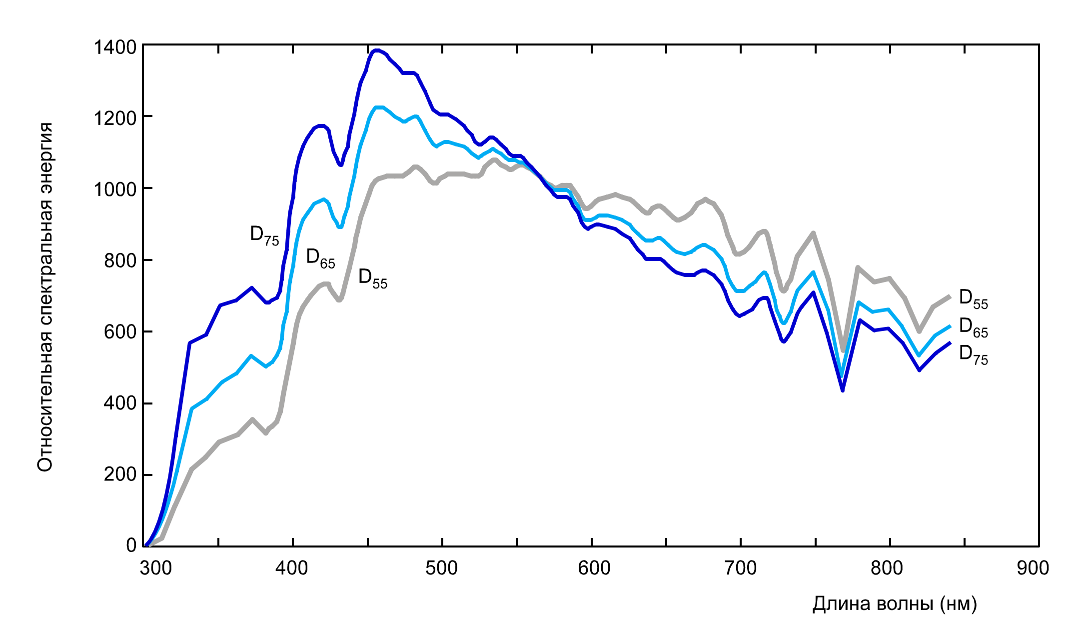


Рис. 8.2 Относительные спектральные распределения энергии стандартных CIE-осветителей:
— D_{55} — типичный солнечный свет при ясном небе;
— D_{65} — средний дневной свет;
— D_{75} — типичный свет от северной стороны небосклона.

материалов, Международная комиссия по освещению стандартизировала серию спектральных распределений энергии, представляющих дневной свет на всех длинах волн в диапазоне от 300 до 830 нм. Одно из таких распределений (D_{65}) показано на рис. 8.1.

На рис. 8.2 дана та же кривая (D_{65}), но уже вместе с двумя другими: индексом «65» отмечено распределение энергии стандартного дневного света, предназначенное к широкому употреблению; индексом «55» — распределение, представляющее чуть более желтый дневной свет, какой бывает, когда свет солнца смешивается со светом неба; индексом «75» — распределение световой энергии, представляющее синеватый дневной свет северной части небосвода.

Стоит отметить, что все три варианта дневного света определены лишь как стандартные спектральные распределения энергии (стандартные CIE-осветители), тогда как S_A, S_B и S_C — как фактические физические источники света. Первые более подходят для колориметрических вычислений, вторые — для фактического просмотра. Спектральные распределения энергии осветителей D_{75}, D_{65} и D_{55} доступны лишь в виде специальных таблиц, поскольку эти распределения получены путем измерений спектрального состава дневного света, выполненных в разных точках земного шара, и не могут быть воспроизведены искусственно (Judd, MacAdam и Wyszecki, 1964). То есть: стандартные D-осветители предназначены только для представления нескольких возможных вариантов фактического солнечного освещения, которое, к примеру, может оказаться краснее или синее, чем D_{55}, и зависеть при этом от высоты солнца, погодных условий и т.п.

В дополнение к стандартным осветителям в колориметрии часто используется гипотетический равноэнергетический E-осветитель (S_E) с одинаковой энергией по всем длинам волн видимого спектра.

Отметим, что по сей день не приняты стандартные осветители по разным видам флуоресцентных источников, но в Приложении 2 даны спектральные распределения

некоторых ламп, используемых на практике. Там же даны спектральные распределения осветителей «A», «B», «C», D_{50}, D_{55}, D_{65} и D_{75}.

Особо отметим, что в полиграфии стандартом является D_{50}-осветитель, который подобен D_{55}, но чуть желтее последнего.

8.3 СТАНДАРТНЫЕ НАБЛЮДАТЕЛИ

В седьмой главе мы показали, что некий цветовой стимул «C» можно визуально уравнять аддитивной смесью соответствующих количеств (R_C, G_C и B_C) кардинальных (уравнивающих) стимулов R, G и B. Однако, когда разные наблюдатели уравнивают один и тот же стимул с помощью одних и тех же RGB-стимулов, мы наблюдаем легкие отличия в их колориметрических количествах, необходимых для достижения визуального соответствия. Часть из этих отличий случайна и исчезает, когда результаты нескольких экспериментов усредняются. Оставшиеся реальные отличия относят на счет особенностей цветового зрения отдельных наблюдателей. Некоторые наблюдатели весьма сильно отклоняются от среднего, что попадает в категорию т.н. *цветовых аномалий* или даже *цветовой слепоты*. Однако же **результаты, полученные от большинства здоровых наблюдателей, дают разброс в весьма узком диапазоне значений**.

В 1931 г. путем усреднения данных, полученных в экспериментах В.Д. Райта и Дж. Гилда (W.D. Right и J. Guild) по цветовому уравниванию в двухградусном поле зрения[1], а также в экспериментах К.С. Гибсона и Е.П.Т. Тиндалла (K.S. Gibson и E.P.T. Tyndall) по определению субъективной яркости монохроматических стимулов[2], CIE позиционировала т.н. *Стандартного колориметрического наблюдателя*.

Фактически Стандартный колориметрический наблюдатель (далее — Стандартный наблюдатель) описывается тремя кривыми цветового соответствия зрительной системы человека (трихроматическими кривыми) по уравнивающим стимулам с длинами волн 700.0 (R_O), 546.1 (G_O) и 435.8 (B_O)[3], где колориметрическая единица (единичное значение) каждого стимула позиционирована исходя из условия, что для визуального уравнивания равноэнергетического осветителя S_E необходимы равновеликие колориметрические количества этих стимулов (рис. 8.3).

С помощью кривых рис. 8.3 из спектрального распределения энергии того или иного цветового стимула можно рассчитать (по методу, описанному в разделе 7.4) величины трех уравнивающих стимулов, необходимые зрительной системе Стандартного наблюдателя для визуального уравнивания этого стимула в 2-градусном поле зрения. Такой расчет точно соответствует международно принятой спецификации цветовых стимулов. Примечательно, что такому расчету требуются лишь сугубо физические данные (спектральное распределение энергии стимула), а в мероприятиях по визуальному цветовому уравниванию нет необходимости.

Треугольник цветностей по уравнивающим стимулам CIE (см. выше) и соответствующие единицы показаны на рис. 7.7. Позиция любого цветового стимула в этом треугольнике вычисляется из *RGB*-количеств трех уравнивающих стимулов по уравнениям:

$$r = R/(R+G+B)$$
$$g = G/(R+G+B)$$

1 17 наблюдателей, не страдающих цветовыми аномалиями.

2 Данные усреднены по нескольким сотням наблюдателей.

3 Подстрочный индекс «O» означает «observer» — наблюдатель. — *Прим. пер.*

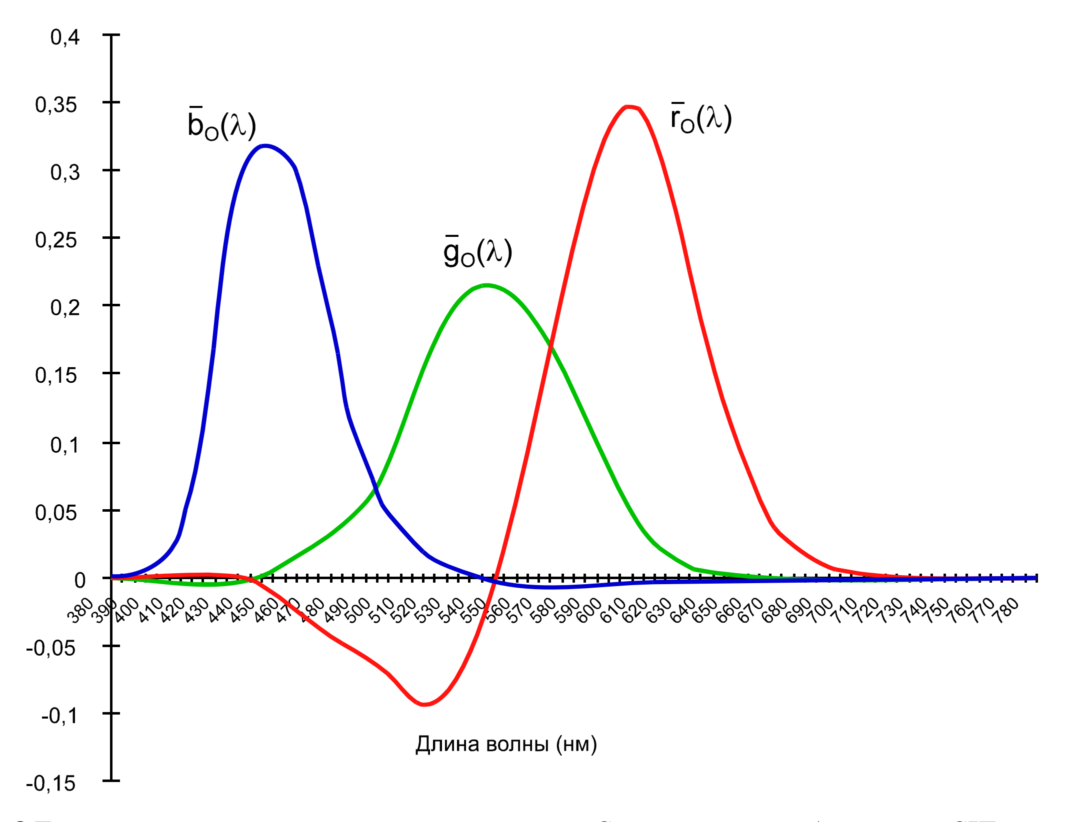


Рис. 8.3 Трихроматические кривые двухградусного Стандартного наблюдателя CIE, построенные с использованием уравнивающих монохроматических стимулов (с длинами волн 700.0, 546.1 и 435.8 нм соответственно), единичные колориметрические количества которых уравнивают цветовое ощущение от равноэнергетического источника S_E.

Нельзя не сказать, что данные, именуемые «Стандартный наблюдатель», принятые CIE в 1931 г., с честью выдержали испытание временем и легли в основу широко и успешно применяемой системы колориметрической спецификации цветовых стимулов. Вместе с тем в ней имеются небольшие погрешности, а именно: неточности, касающиеся величин относительных яркостей, принятых по монохроматическим стимулам, а также небольшие ошибки, возникающие вследствие влияния на результат углового размера поля зрения.

В связи с этим в теддингтонской национальной физической лаборатории было выполнено полное экспериментальное переопределение трихроматических кривых зрительной системы человека с использованием как двухградусного поля зрения (то есть точно такого же, как в экспериментах Дж. Гилда и В.Д. Райта), так и десятиградусного (Stiles, 1955; Stiles и Burch, 1958). Результаты эксперимента по двухградусному полю оказались очень близкими к данным CIE от 1931 г., за исключением того, что подтвердились давние опасения о несколько заниженной яркости монохроматических стимулов фиолетового конца спектра (несмотря на то, что упомянутые отличия весьма велики и по некоторым длинам волн истинные значения порой много больше стандартных, действующая спецификация не подверглась существенному пересмотру, поскольку вклад этих длин волн в общую яркость стимула столь мал, что не имеет принципиального значения).

Сравнение результатов измерений по 2-х и 10-градусному полям показало, что ме-

жду ними имеют место существенные отличия, вследствие чего для измерений по полям большого размера (>4°) был принят 10-градусный Стандартный наблюдатель (CIE, 1960 и 1964). Однако в деле цветовоспроизведения основной интерес представляют образцы с угловым размером в районе 2°, и, следовательно, вполне можно довериться кривым 1931 г.

8.4 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Если мы сравним треугольник, показанный на рис. 7.7, с треугольниками других рисунков 7-й главы, то заметим, что его спектральный локус имеет необычно большую выпуклость в области отрицательных значений (r-область): дело в том, что уравнивающий стимул с длиной волны 546.1 нм сам по себе воспринимается скорее желто-зеленым, нежели зеленым. По этой причине (и ряду других) CIE позиционировала три новых уравнивающих стимула (X, Y и Z), с помощью которых также можно описать Стандартного наблюдателя.

Количества XYZ-стимулов, необходимые для уравнивания любого исследуемого цветового стимула, можно вычислить из соответствующих ему количеств RGB-стимулов с помощью ряда уравнений, известных как *уравнения колориметрического преобразования*. Таким образом, если мы имеем:

$$C(\mathrm{C}) \equiv R(\mathrm{R}) + G(\mathrm{G}) + B(\mathrm{B}),$$

а также знаем, что:

$$1.0(\mathrm{R}) \equiv A_1(\mathrm{X}) + A_2(\mathrm{Y}) + A_3(\mathrm{Z})$$
$$1.0(\mathrm{G}) \equiv A_4(\mathrm{X}) + A_5(\mathrm{Y}) + A_6(\mathrm{Z}),$$
$$1.0(\mathrm{B}) \equiv A_7(\mathrm{X}) + A_8(\mathrm{Y}) + A_9(\mathrm{Z})$$

мы можем заменить (R), (G) и (B) на (X), (Y) и (Z) и получить:

$$C(\mathrm{C}) \equiv X(\mathrm{X}) + Y(\mathrm{Y}) + Z(\mathrm{Z}),$$

где:

$$X = A_1R + A_2G + A_3B$$
$$Y = A_4R + A_5G + A_6B$$
$$Z = A_7R + A_8G + A_9B$$

Позицию С-стимула в XYZ-треугольнике можно затем вычислить по уравнениям:

$$x = X/(X+Y+Z)$$
$$y = Y/(X+Y+Z)$$

Таким образом, уравнения, связывающие две системы, содержат коэффициенты с A_1 по A_9, но, как мы видели выше, эти коэффициенты могут содержаться в любом из трех тождеств цветового соответствия, то есть для 1.0(R), 1.0(G) и 1.0(B) или в трех обычных алгебраических уравнениях, то есть для X, Y и Z.

В прошлом уравнения такого типа зачастую использовались без пояснительных отметок, указывающих на то, что речь идет о цветовом уравнивании. К сожалению, смысл данного набора уравнений принципиально отличен от общепринятого, поэтому

они требуют очень осторожной интерпретации. Однако если один из комплектов уравнений известен, то по аналогии с приведенным выше примером выражения можно записать в ином виде (см. Приложение 1).

Для получения формул обратного преобразования уравнения обоих типов можно решить как систему уравнений:

$$1.0(\mathrm{X}) \equiv B_1(\mathrm{R}) + B_2(\mathrm{G}) + B_3(\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{Y}) \equiv B_4(\mathrm{R}) + B_5(\mathrm{G}) + B_6(\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{Z}) \equiv B_7(\mathrm{R}) + B_8(\mathrm{G}) + B_9(\mathrm{B})$$

$$R = B_1 X + B_2 Y + B_3 Z$$
$$G = B_4 X + B_5 Y + B_6 Z$$
$$B = B_7 X + B_8 Y + B_9 Z$$

Данные рассуждения вполне применимы не только к двум тройкам стимулов R, G, B и X, Y, Z, но и к любым другим парам троек уравнивающих стимулов. Отметим, что величины коэффициентов A_1-A_9 и B_1-B_9 будут зависеть как от специфики уравнивающих стимулов, так и от того, что принято за единицу в каждой тройке (подробно матричная алгебра, описывающая переход от одной тройки уравнивающих стимулов к другой, дана в Приложении 1).

Колориметрические количества CIE XYZ-стимулов (X, Y, Z) соотносятся с колориметрическими количествами R_0, G_0, B_0-стимулов (R_0, G_0, B_0) по уравнениям:

$$X = 0.49R_0 + 0.31G_0 + 0.20B_0$$
$$Y = 0.17697R_0 + 0.81240G_0 + 0.01063B_0$$
$$Z = 0.00R_0 + 0.01G_0 + 0.99B_0$$

Данные уравнения были использованы при пересчете усредненных трихроматических кривых зрительной системы человека (далее — трихроматических кривых Стандартного наблюдателя), показанных на рис. 8.3, в двухградусные трихроматические кривые Стандартного наблюдателя $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, показанные на рис. 8.6. Набор соответствующих уравнений выглядел так:

$$1.0(\mathrm{X}) \equiv 2.3646(\mathrm{R}_0) - 0.5151(\mathrm{G}_0) + 0.0052(\mathrm{B}_0)$$
$$1.0(\mathrm{Y}) \equiv -0.8965(\mathrm{R}_0) + 1.4264(\mathrm{G}_0) - 0.0144(\mathrm{B}_0)$$
$$1.0(\mathrm{Z}) \equiv -0.4681(\mathrm{R}_0) + 0.0887(\mathrm{G}_0) + 1.0092(\mathrm{B}_0)$$

Уравнивающие стимулы X_{10}, Y_{10} и Z_{10}, использованные для спецификации 10-градусного Стандартного наблюдателя CIE, несколько иные, и их соотношение с R_0, G_0, B_0-стимулами описывается набором уравнений со слегка отличными коэффициентами. Разумеется, эти уравнения были использованы при пересчете данных десятиградусного уравнивания монохроматических стимулов в десятиградусные трихроматические кривые (также см. рис. 8.6).

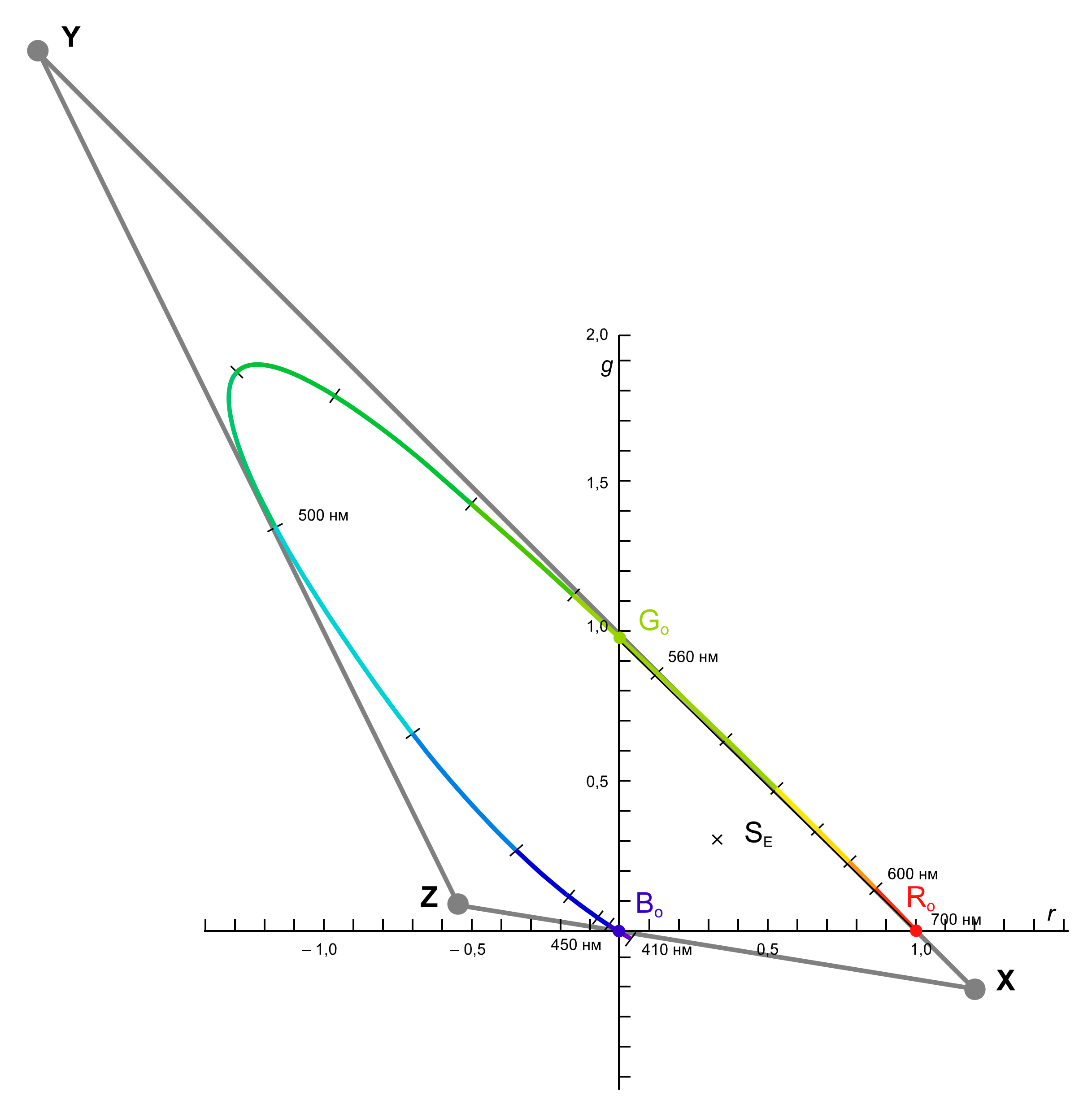


Рис. 8.4 Позиции гипотетических уравнивающих стимулов X, Y и Z в треугольнике цветностей $R_O G_O B_O$, взятом с рис. 7.7.

Позиции стимулов X, Y и Z в R_o, G_o, B_o-треугольнике (рис. 8.4) получают из предыдущих уравнений делением каждого на сумму коэффициентов. Мы видим при этом, что цветности стимулов X, Y и Z лежат за пределами спектрального локуса, и, следовательно, уравнивание монохроматов с их помощью не потребует отрицательных значений. Сказанное означает, что каждый из гипотетических кардинальных стимулов X, Y и Z, применяемых в некоем гипотетическом трехстимульном XYZ-колориметре, состоят каждый из двух частей: X_+ и X_-, Y_+ и Y_-, Z_+ и Z_- соответственно. Компоненты X_+, Y_+ и Z_+ образуют собственно уравнивающую смесь, а компоненты X_-, Y_- и Z_- — добавляются к исследуемому стимулу. При этом цветности компонент каждого из кардиналов различны, но одинаковы их фотометрические яркости. Иными словами, гипотетический колориметр, использующий гипотетические уравнивающие стимулы X, Y и Z,

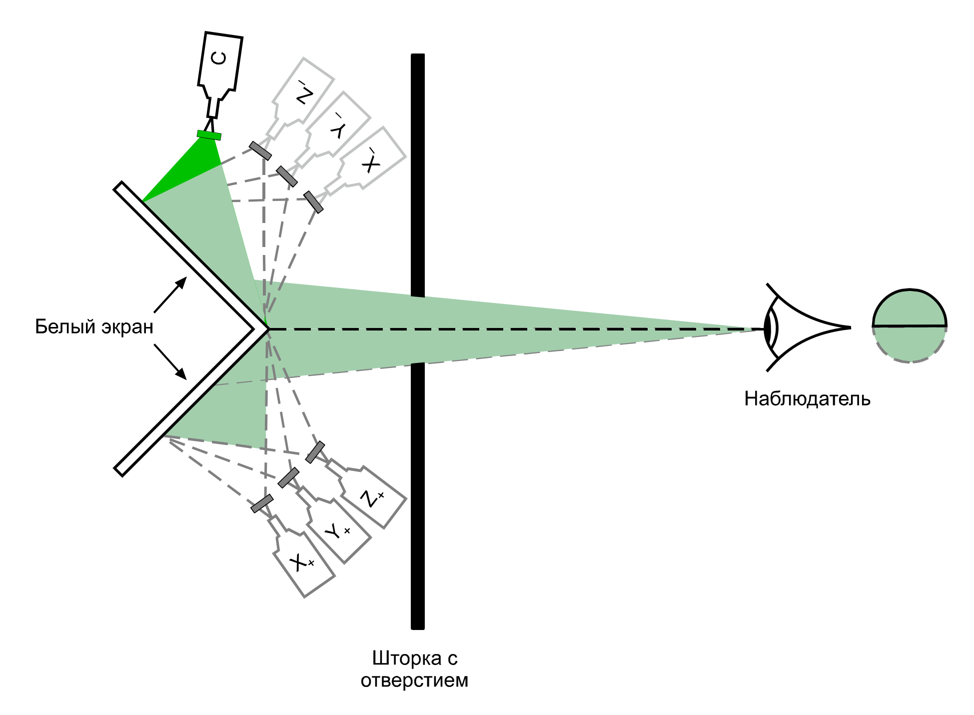


Рис. 8.5 Схема применения гипотетических кардинальных (уравнивающих) стимулов, требующих для собственного уравнивания бо́льших отрицательных значений, чем необходимы «классическим» монохроматическим кардинальным стимулам. Свет от X_--проектора отличен по «цветности» от света X_+-проектора, но колориметрические количества «света» обоих проекторов меняются всегда в одинаковой пропорции; аналогично в отношении двух других пар проекторов (Hunt, 1954).

устроен так, что, к примеру, повышение величины X означает не только добавку некоторого количества стимула X_+ к смеси сравнения, но также, автоматически, пропорциональную добавку стимула X_- к стимулу исследуемому. Аналогично по стимулам Y и Z (см. рис. 8.5).

Отметим, что при уравнивании монохроматических стимулов уйти от отрицательных значений можно только описанным путем. Однако поскольку создать колориметр с уравнивающими стимулами XYZ невозможно в принципе, то использовался традиционный прибор, подобный тому, что показан на рис. 7.1, а данные, полученные с него, были алгебраически преобразованы в систему *XYZ*.

Далее: часто возникает необходимость пересчета в *XYZ*-значения не фактических *RGB*-величин, а только пропорциональных им значений r, g и b. Последние пересчитываются в x, y и z, где $r+g+b=1$ и $x+y+z=1$. Преобразование удобно выполнять по следующим уравнениям:

$$x = \frac{a_1 r + a_2 g + a_3}{a_7 r + a_8 g + a_9}$$

$$y = \frac{a_4 r + a_5 g + a_6}{a_7 r + a_8 g + a_9}$$

$$z = 1 - x - y$$

Величины коэффициентов в данных формулах и в уравнениях, данных выше, относятся друг к другу следующим образом:

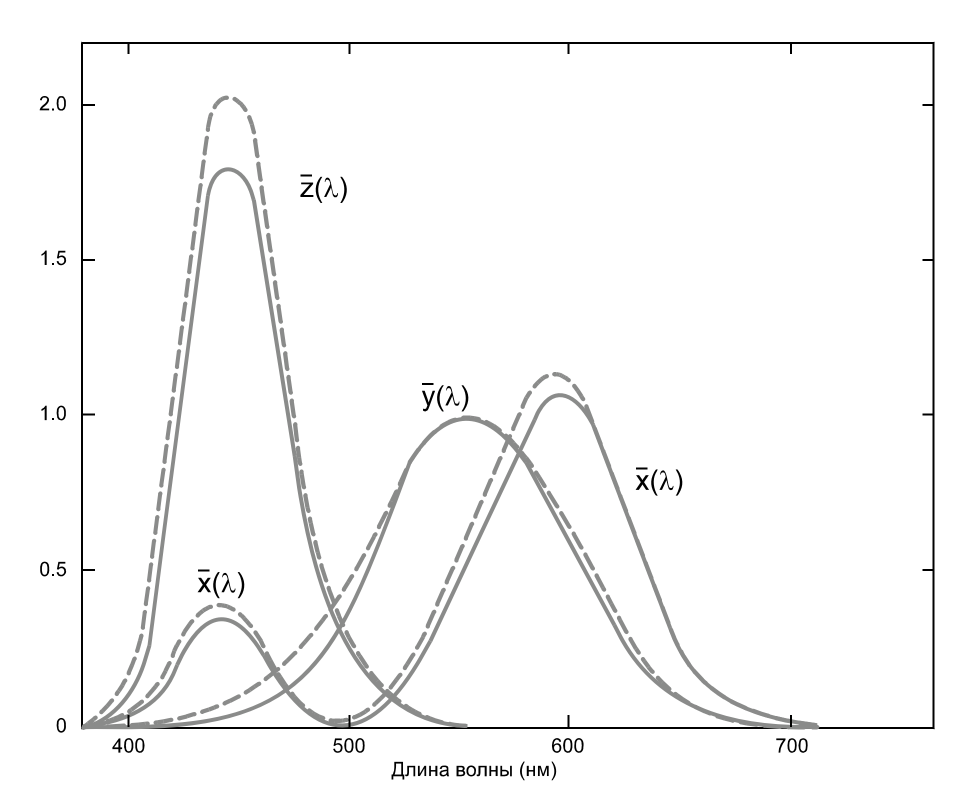


Рис. 8.6 Трихроматические кривые по уравнивающим гипотетическим стимулам CIE X, Y, и Z. Сплошные линии — двухградусный Стандартный наблюдатель. Пунктирные линии — десятиградусный Стандартный наблюдатель (уравнивающие стимулы X_{10}, Y_{10} и Z_{10})

$$a_1 = A_1 - A_7 \quad a_4 = A_2 - A_8 \quad a_7 = A_1 + A_2 + A_3 - A_7 - A_8 - A_9$$
$$a_2 = A_4 - A_7 \quad a_5 = A_5 - A_8 \quad a_8 = A_4 + A_5 + A_6 - A_7 - A_8 - A_9$$
$$a_3 = A_7 \quad a_6 = A_8 \quad a_9 = A_7 + A_8 + A_9$$

Коэффициенты обратных уравнений рассчитываются аналогично:

$$r = \frac{b_1 x + b_2 y + b_3}{b_7 x + b_8 y + b_9}$$
$$g = \frac{b_4 x + b_5 y + b_6}{b_7 x + b_8 y + b_9}$$
$$b = 1 - r - g$$

Коль скоро:

$$A_1 = a_1 + a_3 \quad A_2 = a_4 + a_5 \quad A_3 = a_7 + a_9 - a_1 - a_3 - a_4 - a_6$$
$$A_4 = a_2 + a_3 \quad A_5 = a_5 + a_6 \quad A_6 = a_8 + a_9 - a_2 - a_3 - a_5 - a_6,$$
$$A_7 = a_3 \quad A_8 = a_6 \quad A_9 = a_9 - a_3 - a_6$$

то аналогичные выражения связывают B_1-B_9 с b_1-b_9.

8.4.1 Проективные преобразования

Направление векторов смещения точек в треугольнике цветностей при переходе от одного набора уравнивающих стимулов к другому набору выразить очень просто: все цветовые стимулы треугольника, основанного на данных двухградусного Стандартного наблюдателя (рис. 8.3), — это результат т.н. *проективных преобразований* треугольника рис. 7.7 в треугольник рис. 8.4. Сходным образом все треугольники цветностей, основанные на данных десятиградусного Стандартного наблюдателя, проективно преобразуются один в другой.

Проективное преобразование треугольника цветностей можно выполнить, взяв плоскость и точку «P», расположенную где-либо в пространстве относительно интересующего нас треугольника, и перенеся каждую точку этого треугольника по прямым линиям, проходящим через «P», на другую плоскость (рис. 8.7).

Далее: пусть точка «M» расположена в RGB-треугольнике. Точка «P» и плоскость с XYZ-треугольником расположены в пространстве. Позиция цветового стимула, отмеченного как «M» в RGB-треугольнике, займет позицию «N» в треугольнике XYZ. «N» — это точка пересечения прямой MP с плоскостью XYZ-треугольника.

То, что описанное является геометрической интерпретацией уравнений преобразования, легко доказывается следующим (рис. 8.7):

— линию пересечения RGB- и XYZ-плоскостей обозначим как R′O′X′;

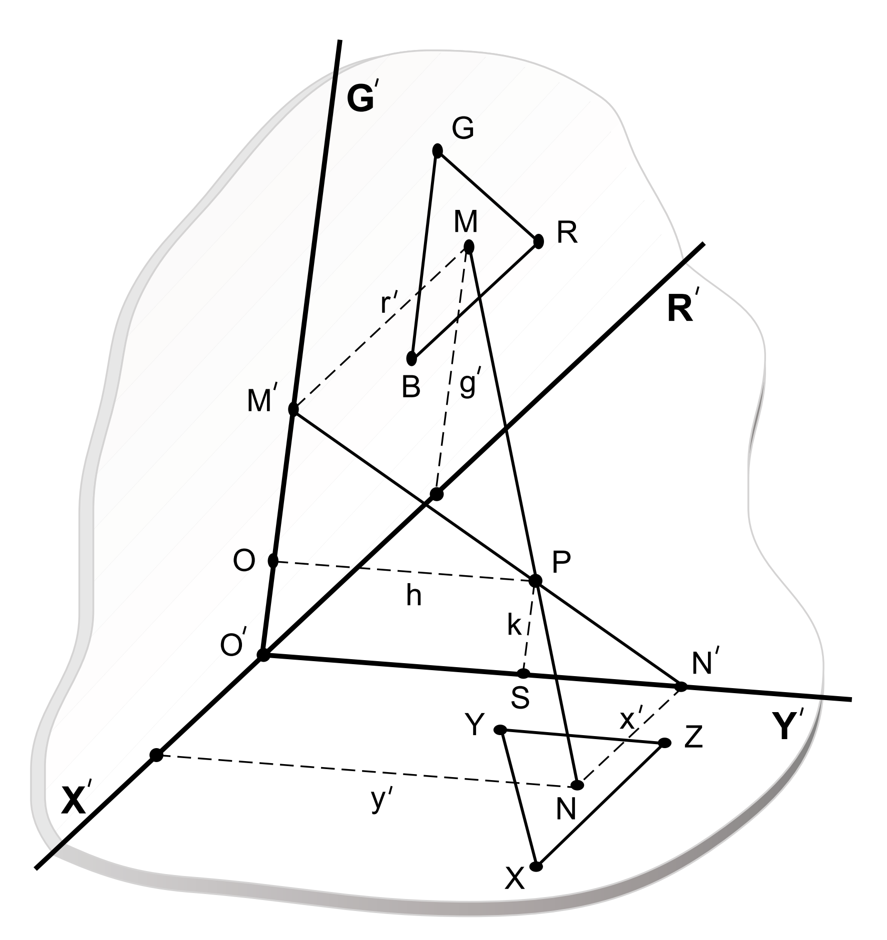


Рис. 8.7 Общий принцип проективных преобразований.

— пусть O′ будет расположена так, что PO′ и R′X′ образуют прямой угол, и пусть O′G′ и O′Y′ располагаются под прямым углом к R′X′ соответственно в RGB- и XYZ-плоскостях;

— проведем линию MM′ под прямым углом к O′G′ и линию NN′ под прямым углом к O′Y′;

— проведем параллельно O′Y′ линию PQ и параллельно O′G′ линию PS.

Используя строчные литеры для представления образовавшихся отрезков, получим:

$$\frac{x'}{r'} = \frac{\mathrm{PN}'}{\mathrm{PM}'} = \frac{k}{g'-k} \therefore x' = \frac{kr'}{g'-k}$$

$$\frac{y'}{g'} = \frac{\mathrm{O'N'}}{\mathrm{O'M'}} = \frac{h}{g'-k} \therefore y' = \frac{hg'}{g'-k}$$

Отметим, что r' и g' — это координаты точки «M» в осях O′R′ и O′G′, а x' и y' — координаты точки «N» в осях O′X′ и O′Y′. Следовательно, координаты интересующих нас точек будут соотноситься с r и g и с x и y по уравнениям:

$$r' = c_1 r - c_2 g + c_3$$
$$g' = c_2 r + c_1 g + c_4$$
$$x' = c_5 x - c_6 y + c_7$$
$$y' = c_6 x + c_5 y + c_8$$

Заменив уравнения для x' и y' уравнениями, данными выше, можно получить:

$$x = \frac{a_1 r + a_2 g + a_3}{a_7 r + a_8 g + a_9}$$

$$y = \frac{a_4 r + a_5 g + a_6}{a_7 r + a_8 g + a_9}$$

Таким образом, проективное преобразование — это геометрический эквивалент преобразований колориметрических.

8.5 СВОЙСТВА XYZ-СИСТЕМЫ

Вспомним, что коль скоро цветности стимулов X, Y и Z лежат за пределами спектрального локуса, то стимулы эти состоят из света, добавляемого не только к смеси сравнения, но также и к исследуемому стимулу «C» (рис. 8.5). В XYZ-системе цветность светового потока (X_-), добавленного с помощью X-стимула к исследуемому стимулу «C», отлична от цветности светового потока (X_+), добавленного к смеси сравнения, но при этом *фотометрическая яркость* обоих одинакова.

Аналогично фотометрическая яркость обеих частей Z-стимула также одинакова.

Из сказанного выше следует, что вся яркость тестового стимула будет уравнена яркостью стимула «Y». Таким образом, вариации количеств стимулов «X» и «Z» влияют только на цветность смеси, но не влияют на ее яркость, что является очевидным преимуществом системы XYZ перед другими колориметрическими системами.

Проиллюстрируем последнее утверждение.

Предположим, есть два стимула — C_1 и C_2, результаты цветового уравнивания которых известны. В RGB-системе мы получим:

$$k_1(C_1) \equiv R_1(\mathrm{R}) + G_1(\mathrm{G}) + B_1(\mathrm{B})$$
$$k_2(C_1) \equiv R_2(\mathrm{R}) + G_2(\mathrm{G}) + B_2(\mathrm{B})$$

Далее, если мы захотим сравнить яркости этих стимулов, то нам придется конвертировать колориметрические показатели R, G и B, в единицы фотометрической яркости. Допустим, такая конверсия потребует коэффициентов L_R, L_G и L_B. Искомые яркости (L_1 и L_2) тогда будут выражены как:

$$L_1 = L_\mathrm{R} R_1 + L_\mathrm{G} G_1 + L_\mathrm{B} B_1$$
$$L_2 = L_\mathrm{R} R_2 + L_\mathrm{G} G_2 + L_\mathrm{B} B_2$$

Коль скоро в XYZ-системе

$$k_1(C_1) \equiv X_1(\mathrm{X}) + Y_1(\mathrm{Y}) + Z_1(\mathrm{Z})$$
$$k_2(C_1) \equiv X_2(\mathrm{X}) + Y_2(\mathrm{Y}) + Z_2(\mathrm{Z}),$$

то L_1 и L_2 можно выразить как:

$$L_1 = L_\mathrm{X} X_1 + L_\mathrm{Y} Y_1 + L_\mathrm{Z} Z_1$$
$$L_2 = L_\mathrm{X} X_2 + L_\mathrm{Y} Y_2 + L_\mathrm{Z} Z_2.$$

Поскольку стимулы «X» и «Z» не влияют на яркость уравнивающей смеси, то $L_\mathrm{X} = L_\mathrm{Z} = 0$, и, следовательно, данные выражения сокращаются до простых:

$$L_1 = L_\mathrm{Y} Y_1$$
$$L_2 = L_\mathrm{Y} Y_2$$

Более того, когда требуется сравнить лишь фотометрические яркости двух стимулов, мы можем воспользоваться предельно простым соотношением:

$$L_1 / L_2 = Y_1 / Y_2$$

Фотометрические яркости L_R, L_G и L_B по колориметрически единичным количествам уравнивающих стимулов системы $\mathrm{R_O}$, $\mathrm{G_O}$, $\mathrm{B_O}$ находятся в соотношении 1.0000/4.5907/0.0601; коэффициенты стимулов $\mathrm{R_O}$, $\mathrm{G_O}$ и $\mathrm{B_O}$ в уравнениях для Y, данных ранее, находятся в тех же соотношениях (0.17697/0.81240/0.01063) и получены делением оригинальных значений на их сумму (что гарантирует пропорциональность величины «Y» яркости стимула).

Отметим, что XYZ-система очень активно используется в колориметрии, поскольку трихроматические кривые $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$, показанные на рис. 8.6, не имеют участков с отрицательными значениями: как было показано на рис. 8.4, не существует участка спектрального локуса, лежащего вне XYZ-треугольника, и, следовательно, каждый монохроматический стимул можно описать *положительными* смесями XYZ-стимулов.

На рис. 8.8 показан треугольник цветностей XYZ, основанный на данных по двухградусному и десятиградусному Стандартным наблюдателям; величины y отложены

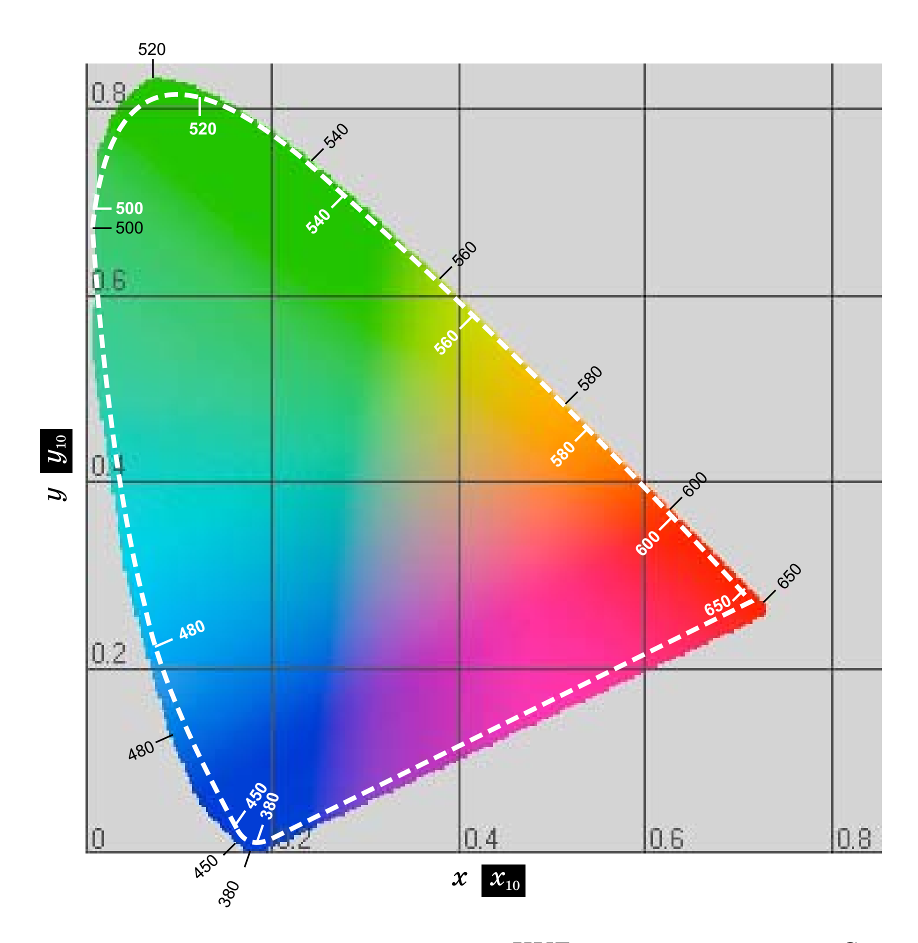


Рис. 8.8 *xy*-треугольники уравнивающих стимулов XYZ для двухградусного Стандартного наблюдателя) и $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ для десятиградусного Стандартного наблюдателя (белая пунктирная линия).

по ординатам, *x* — по абсциссам и рассчитаны по уравнениям, показанным ниже (для 10° наблюдателя используются стимулы X_{10}, Y_{10} и Z_{10}):

$$y = Y / (X + Y + Z)$$
$$x = X / (X + Y + Z)$$

8.5.1 Применение спектрометрии в колориметрических целях

Мы знаем, что XYZ-спецификация любого цветового стимула требует либо выполнения уравнивания на гипотетическом XYZ-колориметре (рис. 8.5), которое дает непосредственный ответ (Hunt, 1954), либо, что осуществимо на практике, на обычном RGB-колориметре с последующим математическим преобразованием результатов в XYZ-систему по приведенным ранее уравнениям.

Однако удобнее всего *вычислять* XYZ-данные стимула из спектрального распределения его энергии, измеренного с помощью спектрорадиометра (конкретные величины ординат трихроматических кривых $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ и координат цветности монохроматических стимулов $x(\lambda)$, $y(\lambda)$ и $z(\lambda)$ по Стандартному двухградусному наблюдателю даны в Приложении 2).

Теперь рассмотрим самою процедуру вычислений.

Предположим, имеется прозрачная или отражающая поверхность, коэффициент пропускания (или отражения) которой, скажем, на длине волны 400 нм равен t_1; поверхность освещена источником, энергия которого на данной длине волны равна E_1, следовательно, значения X, Y и Z (X_1, Y_1, Z_1) по данной длине волны рассчитываются так:

$$X_1 = t_1 E_1 \bar{x}_1$$
$$Y_1 = t_1 E_1 \bar{y}_1 \, ,$$
$$Z_1 = t_1 E_1 \bar{z}_1$$

где $\bar{x}_1$, $\bar{y}_1$, $\bar{z}_1$ — это соответственно величины $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ $\bar{z}(\lambda)$ по длине волны 400 нм.

На другой длине волны, скажем 410 нм, имеем:

$$X_2 = t_2 E_2 \bar{x}_2$$
$$Y_2 = t_2 E_2 \bar{y}_2$$
$$Z_2 = t_2 E_2 \bar{z}_2$$

Аналогичный расчет производится по всем длинам волн видимого спектра (обычно с шагом в 5 или 10 нм) с последующим суммированием полученных значений:

$$X = t_1 E_1 \bar{x}_1 + t_2 E_2 \bar{x}_2 + t_3 E_3 \bar{x}_3 + \ldots = \sum tE\bar{x}$$
$$Y = t_1 E_1 \bar{y}_1 + t_2 E_2 \bar{y}_2 + t_3 E_3 \bar{y}_3 + \ldots = \sum tE\bar{y}$$
$$Z = t_1 E_1 \bar{z}_1 + t_2 E_2 \bar{z}_2 + t_3 E_3 \bar{z}_3 + \ldots = \sum tE\bar{z}$$

По цветовым стимулам, полученным от пропускающих и отражающих объектов, данная сумма обычно умножается на некий нормирующий коэффициент, приводящий величину «Y» к 100. Сие значит, что величина «Y» стимула, полученного за счет отражения (или пропускания) равноэнергетического света от идеально отражающей (или идеально пропускающей) поверхности ($t = 1$ по всем длинам волн) равна 100. Величина «Y» любого другого стимула берется как *доля* от коэффициента отражения или пропускания, поскольку Y-значения любых двух стимулов пропорциональны их фотометрической яркости.

В системе XYZ полная зависимость величины «Y» от яркости стимула объясняется тем, что кривая $\bar{y}(\lambda)$ представляет относительные яркости монохроматических стимулов всего спектра; $\bar{y}(\lambda)$ — это важнейшая фотометрическая кривая, которая в самой фотометрии носит название «*кривой спектральной световой эффективности*» — $V(\lambda)$.

8.5.2 Применение закона центра тяжести

То, что в XYZ-системе величина «Y» зависит только от фотометрической яркости стимула, упрощает использование закона центра тяжести: предположим, что мы хотим определить цветность смеси, состоящей из m_1 фотометрических единиц стимула C_1 и m_2 фотометрических единиц стимула C_2, причем координаты цветности C_1 и C_2 соответственно равны x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2. Формально позиция центра тяжести весов определяется по выражениям (см. раздел 7.6):

$$m_1 / (L_X x_1 + L_Y y_1 + L_Z z_1) \, ,$$
$$m_2 / (L_X x_2 + L_Y y_2 + L_Z z_2)$$

но поскольку в данном случае $L_X = L_Z = 0$, то выражения сокращаются до:

$$m_1 / L_Y y_1$$
$$m_2 / L_Y y_2$$

При этом мы видим, что из обоих выражений можно исключить L_Y, сократив их тем самым до простейших:

$$m_1 / y_1$$
$$m_2 / y_2$$

8.5.3 Доминирующая длина волны и условная колориметрическая чистота

Благодаря тому что величина Y пропорциональна фотометрической яркости стимулов, ее можно в определенной степени связать с такими перцепционными атрибутами, как субъективная яркость и светлота. Однако прямой корреляции величин X и Z с цветовым тоном не существует — X и Z связаны с таким колориметрическим понятием, как *доминирующая длина волны стимула* (λ_d):

⇨ Доминирующая длина волны стимула — это длина волны монохроматического стимула, который для достижения визуального уравнивания со стимулом исследуемым должен быть в определенной пропорции аддитивно смешан с неким строго определенным ахроматическим стимулом.

Понятие «доминирующая длина волны» легко истолковать графически, проведя на диаграмме цветностей прямую линию, проходящую через точки N (представляет ахроматический стимул) и C (представляет исследуемый стимул), и продолжив ее до пересечения с линией спектрального локуса (точка D), на котором отмечена искомая длина волны (в случае пурпурных стимулов мы говорим о т.н. *дополнительной длине волны* — λ_c).

Аналогичную связь величин X и Z с чистотой цвета (один из вариантов относительной полноты цвета) можно показать, вычислив отношение длины отрезка NC к ND, которое в лексике xy-диаграммы цветностей (CIE) именуется «*условной колориметрической чистотой*» — p_e. (В случае пурпурных стимулов D — это точка, лежащая на линии, которая соединяет точки, представляющие стимулы концов видимого спектра.)

Наконец отметим, что величины λ_d и p_e имеют весьма ограниченную практическую ценность, поскольку результат их шкалирования перцепционно неравномерен.

8.6 ПЕРЦЕПЦИОННО РАВНОМЕРНЫЕ ДИАГРАММЫ ЦВЕТНОСТЕЙ

К разговору о перцепционно равномерных диаграммах цветностей нас подталкивает то, что, как было сказано в конце предыдущего раздела, цветности стимулов на CIE xy-диаграмме распределены неравномерно. Сказанное проиллюстрирует рис. 8.9, на котором отрезками представлены хроматические отличия, воспринимаемые с одинаковой перцепционной величиной при двухградусном поле зрения и при одинаковой фотометрической яркости стимулов. Мы видим, что по мере продвижения к вершине диаграммы, где базируются позиции цветностей стимулов зеленых тонов, отрезки ста-

новятся длиннее, а по мере продвижения к левому нижнему ее концу, где находятся позиции цветностей стимулов синих тонов, — короче. Максимальное отличие отрезков по длине фактически является двадцатикратным. Отметим, что, по счастливой случайности, длина отрезков согласуется с утроенными т.н. *едва заметными отличиями* в восприятии цветовых стимулов при двухградусном поле зрения (Wright, 1941).

Несмотря на то что проективное преобразование диаграммы при переходе к какой-либо другой диаграмме не может разрушить соотношения между длинами отрезков хроматических отличий, самоя длина этих отрезков может сильно уменьшиться. Сказанное проиллюстрирует рис. 8.10, на котором показаны линии рис. 8.9, но уже на $u'v'$-диаграмме (см. гл. 7): мы видим, что все отрезки стали почти одинаковой длины и максимальное отличие между ними теперь составляет не более чем 4:1, а по большей части не более чем 2:1.

Итак, мы говорим, что $u'v'$-диаграмма — это т.н. *перцепционно равномерная диаграмма цветностей*, представляющая собой легкую модификацию U′W′-диаграммы Мак-Адама (MacAdam, 1937). Очевидное преимущество последней состоит в том, что на *цветность* трихроматического равенства влияют лишь два стимула (U′ и W′), а его *фотометрическая яркость* определяется только третьим стимулом — V′.

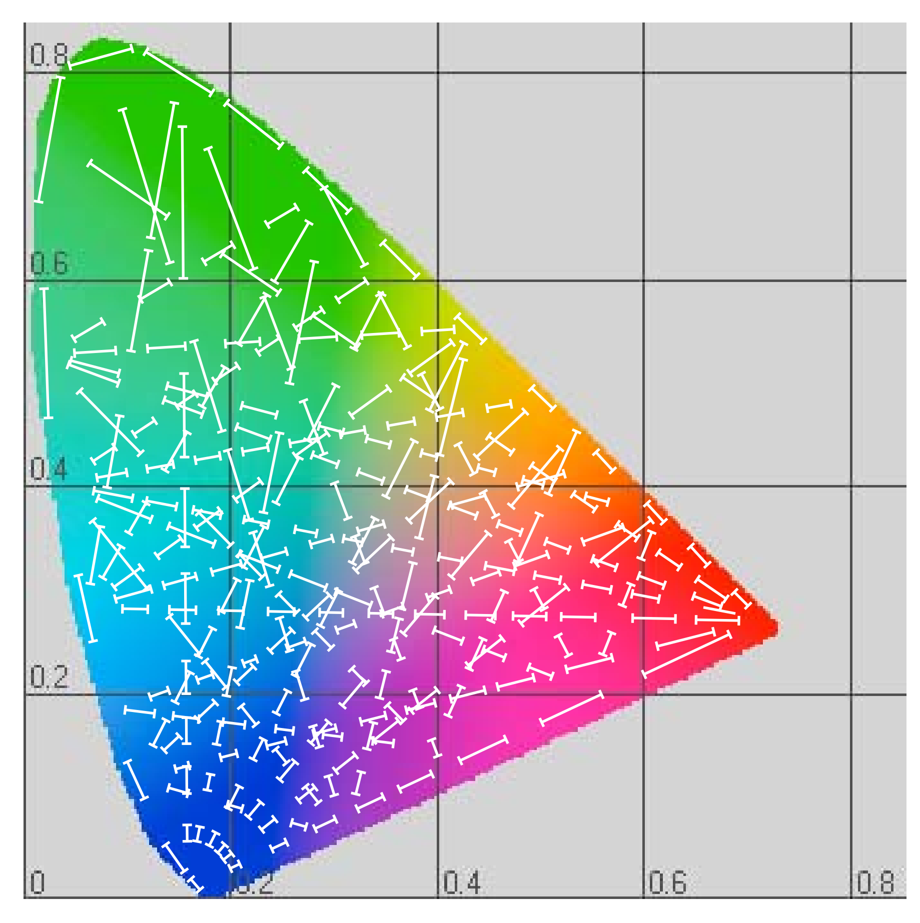


Рис. 8.9 Визуально равные интервалы цветностей при постоянной фотометрической яркости стимулов, нанесенные на xy-треугольник (данные В.Д. Райта).

Уравнения перехода от оригинальной мак-адамовской диаграммы к CIE xy-диаграмме просты и удобны:

$$u = 4x/(-2x + 12y + 3) \quad x = 3u/(2u - 8v + 4)$$
$$v = 6y/(-2x + 12y + 3) \quad y = 2v/(2u - 8v + 4)$$

Более или менее равномерная мак-адамовская диаграмма цветностей была утверждена на брюссельском заседании CIE в 1959 г.: «u» была отложена по оси абсцисс, «v» — по оси ординат (CIE, 1971). Однако на лондонском заседании, состоявшемся в 1975 г., CIE усовершенствовала эту диаграмму, удлинив v-ось в полтора раза (Eastwood, 1975; CIE, 1976). В результате модификации распределение позиций цветностей стимулов стало намного более похожим на распределение образцов в манселловской системе (см. раздел 7.2), что усовершенствовало базис формул расчета цветовых отличий (см. раздел 8.8). Уравнения перехода от модифицированной мак-адамовской диаграммы к CIE xy-диаграмме таковы:

$$u' = 4x/(-2x + 12y + 3) \quad x = 9u'/(6u' - 16v' + 4)$$
$$v' = 9y/(-2x + 12y + 3) \quad y = 4v'/(6u' - 16v' + 4)$$

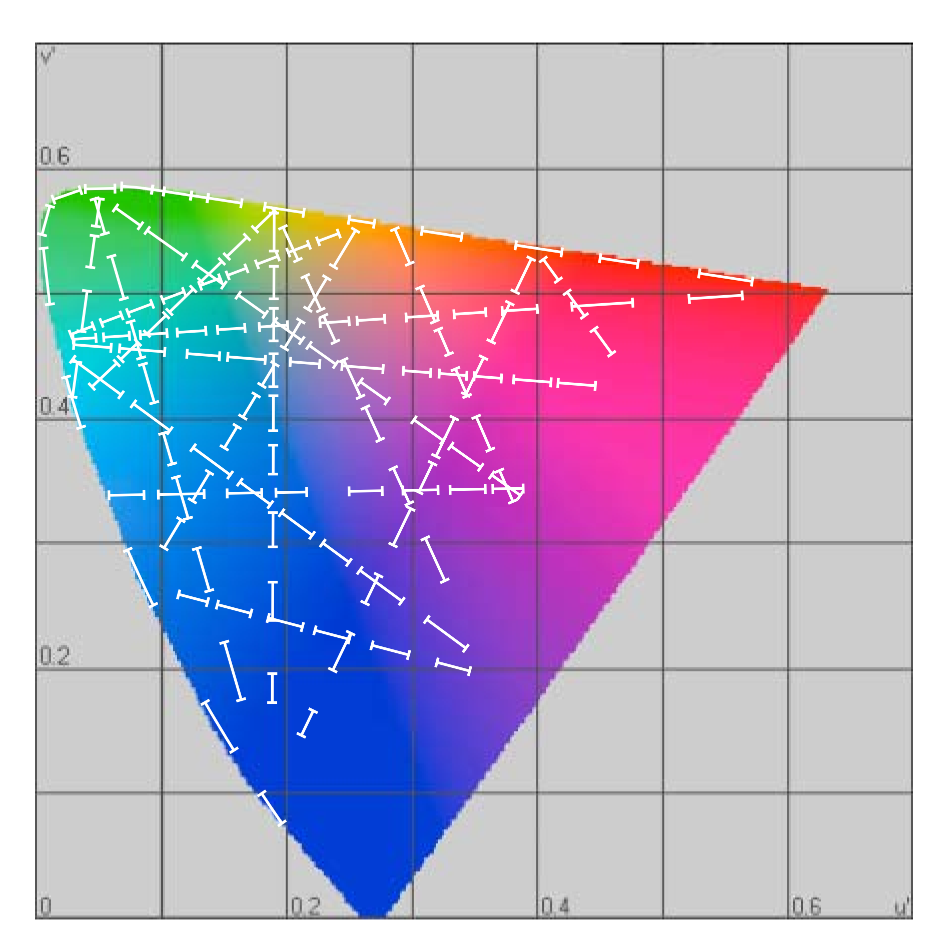


Рис. 8.10 Те же визуально равные интервалы цветностей при постоянной яркости стимулов, нанесенные на $u'v'$-диаграмму цветностей.

На $u'v'$-диаграмме «u'» откладывается по оси абсцисс; «v'» — по оси ординат (как на рис. 8.10). Из вышеприведенных уравнений следует:

$$\begin{aligned} u' &= u \\ v' &= 1.5v \end{aligned},$$

что и требовалось (варианты уравнений перехода между XYZ, UVW и $U'V'W'$ даны в Приложении 2).

Полная $u'v'$-диаграмма показана на рис. 7.9, из которого ясно, что по стимулам дальнего красного угла сумма u' и v' будет больше единицы, и, следовательно, w' окажется отрицательной, поскольку $u'+v'+w'=1$.

В системе U′V′W′ яркости L'_U и L'_W единичных количеств U′ и W′ равны нулю. Закон центра тяжести, следовательно, оперирует только m_1/v'_1 и m_2/v'_2, где v'_1 и v'_2 — это v'-координаты стимулов C_1 и C_2, смешанных в определенном соотношении m_1 и m_2 фотометрических единиц соответственно. Значения координат цветности монохроматических стимулов $u'(\lambda)$ и $v'(\lambda)$ даны в Приложении 2.

В цветном телевидении едва заметные отличия по цветности полагают равными 0.004 на $u'v'$-диаграмме (Jones, 1968), но известно при этом, что на мониторах, уравненных по белой точке на D65, тренированные наблюдатели могут видеть отличия даже при разнице в цветностях порядка 0.002, поэтому в данном случае желателен допуск не более ±0.001 (Knight, 1972).

8.7 НОМОГРАММЫ

Весьма полезным приспособлением, позволявшим переносить данные с одной диаграммы цветностей на другую долгое время являлась т.н. *номограмма*. На рис. 8.11 показана номограмма, использовавшаяся при получении значений u' и v' непосредственно из значений x и y и наоборот. На лист бумаги с номограммой необходимо было положить поверочную линейку, причем так, чтобы она пересекала x-и y-шкалы на интересующих значениях: соответствующие величины u' и v' оказывались в точках пересечения линейки с u'- и v'-шкалами. При получении x- и y-значений, соответствующих выбранным величинам u' и v', линейку устанавливали на необходимые u'- и v'-значения и аналогичным образом снимали значения x и y.

Поскольку номограммы данного типа были очень практичны, но малоизвестны, будет весьма интересно кратко познакомиться с тем, как они были получены.

На рис. 8.11 вдоль осей, идущих под прямым углом, отложены значения двух переменных s и t. Будучи перцепционно равномерной, u'-шкала идет вдоль s-оси, а v'-шкала, будучи также равномерной, идет параллельно ей на расстоянии 1.0 по оси t. Если уравнение для x таково:

$$x = \frac{a_1u' + a_2v' + a_3}{a_7u' + a_8v' + a_9},$$

то x-шкала номограммы дает:

$$s = \frac{a_3 - a_9x}{(a_7 + a_8)x - (a_1 + a_2)}$$

$$t = \frac{a_8x - a_2}{(a_7 + a_8)x - (a_1 + a_2)}$$

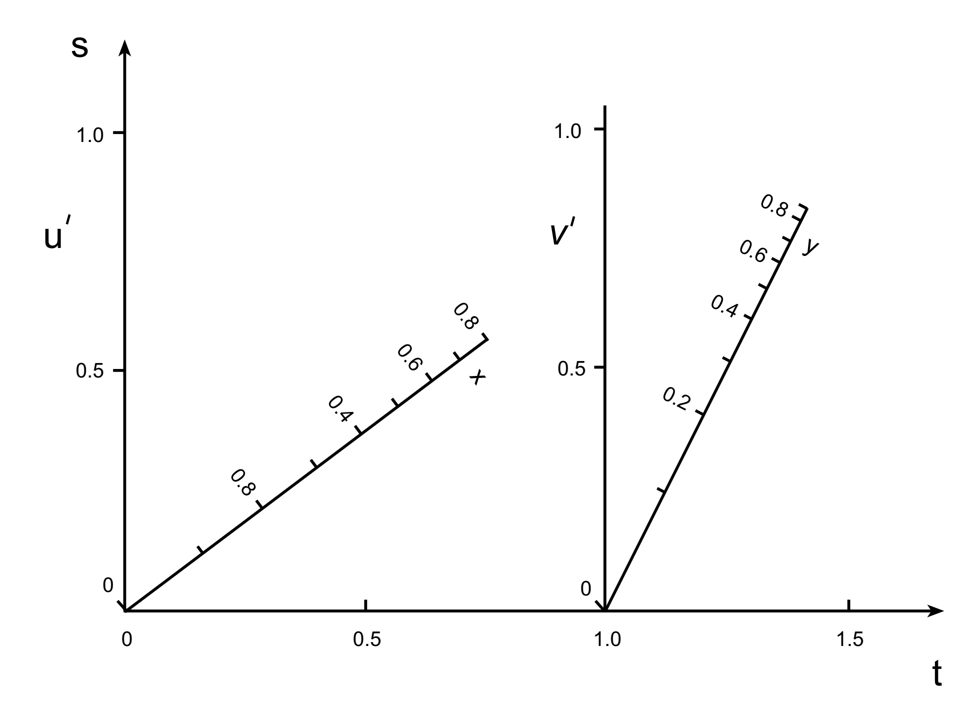


Рис. 8.11 Координатные оси s и t, на которых построена номограмма колориметрических преобразований. На рис. 8.12 дана эта же номограмма, вытянутая вдвое по s-оси для большего удобства.

Если уравнение для y таково:

$$y = \frac{a_4 u' + a_5 v' + a_6}{a_7 u' + a_8 v' + a_9},$$

то y-шкала дает:

$$s = \frac{a_6 - a_9 y}{(a_7 + a_8)y - (a_4 + a_5)}$$

$$t = \frac{a_8 y - a_5}{(a_7 + a_8)y - (a_4 + a_5)}$$

Иногда при расчете номограмм случалось так, что шкалы проходили через бесконечность, в результате чего их рабочие значения располагались крайне неудобно. В таких случаях номограммы рассчитывались по другим парам переменных — y, z и v', w'; кроме того, можно было инвертировать направление одной из шкал (к примеру: $v'' = -v'$) и построить номограмму для v'' с последующим использованием отрицательного участка v''-шкалы в качестве положительной v'-шкалы.

Плюс к тому, коль скоро при проективных преобразованиях все прямые линии остаются прямыми, дозволялась любая проективная трансформация номограмм — при этом их новая форма могла оказаться более удобной, чем была. Сказанное иллюстрирует рис. 8.12: на нем показана номограмма рис. 8.11, которая с целью получения наилучших шкал была вдвое вытянута по вертикали.

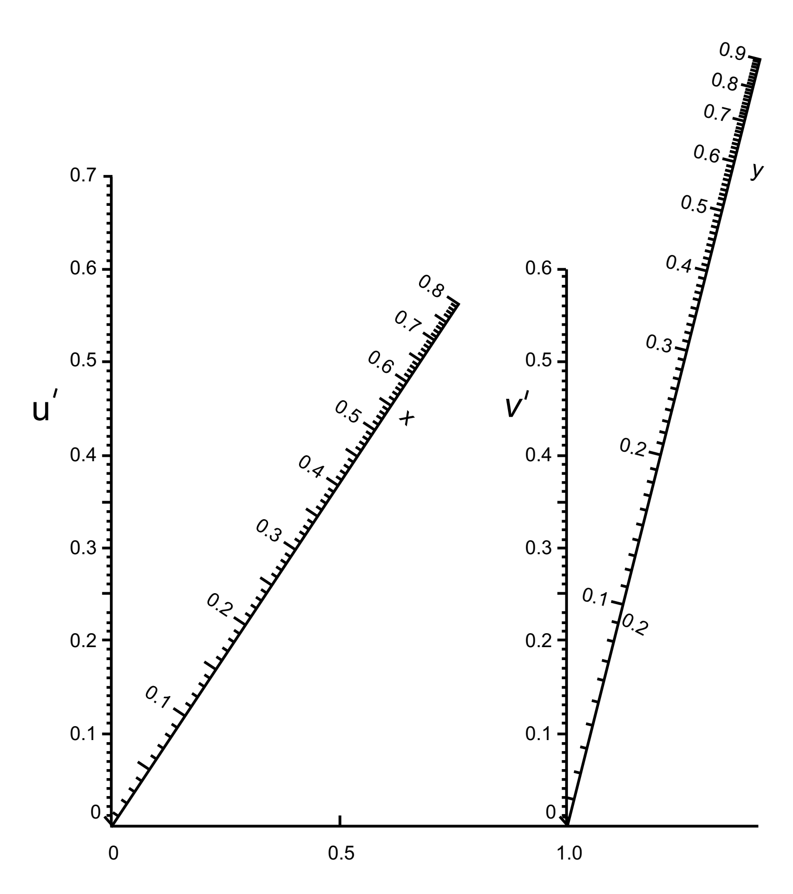


Рис. 8.12 Номограмма перехода от CIE xy-диаграммы к CIE $u'v'$-диаграмме и обратно. Поверочная линейка, пересекающая x-и y-шкалы на интересующих значениях, дает соответствующие значения u' и v' в точках своего пересечения с u'- и v'-шкалами, и наоборот.

8.8 РАВНОМЕРНЫЕ ЦВЕТОВЫЕ ПРОСТРАНСТВА

Цветовые стимулы, которые предъявляются в окружениях с очень низкой яркостью, обычно воспринимаются как самосветящиеся, то есть — без какого-либо серого содержимого в ощущении. Зрение наблюдателей обычно интерпретирует такие стимулы как источник света: солнце, вольфрамовые лампы накаливания, светофоры, флуоресцентные и неоновые лампы, светодиоды, пламя костра обычно принадлежат к этому семейству и иногда их относят к категории т.н. *изолированных цветовых стимулов*.

Чтобы выполнить колориметрическую спецификацию изолированных стимулов, как правило, достаточно определить координаты их цветности и измерить их абсолютную фотометрическую яркость. Однако яркости большинства цветовых стимулов сходны с яркостями их окружений, благодаря чему стимулы эти воспринимаются не как самосветящиеся, а как отражающие или прозрачные объекты, в восприятии которых, как правило, присутствует определенное серое содержимое. Такие стимулы иногда относят к категории т.н. *неизолированных цветовых стимулов*.

По неизолированным цветовым стимулам в дополнение к двум координатам их цветности и величине абсолютной фотометрической яркости должна приниматься во

внимание их *относительная фотометрическая яркость*, т.е. яркость абсолютная, отнесенная к средней яркости их окружения (Hunt, 1977 и 1978).

Сказанное можно проиллюстрировать следующим примером: предположим, что некий цветовой стимул имеет координаты цветности $u' = 0.20$, $v' = 0.47$ и абсолютную фотометрическую яркость 47 кд/м² (таблицу фотометрических единиц и их значения см. в Приложении 3). Если окружение имеет такую же среднюю цветность ($u' = 0.20$, $v' = 0.47$), но среднюю абсолютную яркость в 10 кд/м², то исследуемый стимул скорее всего будет восприниматься белым. Если же среднюю абсолютную яркость окружения поднять до 100 кд/м² — стимул скорее всего станет выглядеть серым.

Восприятие стимула (как белого или как серого) чаще связано с его относительной яркостью, нежели с абсолютной (последняя постоянна), поэтому при колориметрической спецификации этого стимула, как правило, пользуются лишь тремя переменными: двумя координатами цветности и величиной относительной фотометрической яркости. Отметим, что и первое, и второе характеризует воздействие стимула на зрительную систему наблюдателя, но не цветовое ощущение, возникающее под этим воздействием.

Далее. Относительная яркость обычно измеряется как процент от фотометрической яркости некоего белого эталона, например идеального отражающего рассеивателя.

В CIE XYZ-системе трехстимульные значения (XYZ) неизолированных цветовых стимулов всегда измеряются или вычисляются так, чтобы величина Y по идеальному отражающему рассеивателю была бы равна 100.

Если в нашем примере яркость идеального рассеивателя принята равной 50 кд/м² в первом случае и 500 кд/м² — во втором, то в первом случае измеряемый стимул будет иметь колориметрические координаты $u' = 0.20$, $v' = 0.47$, $Y = 90$ (белый), а во втором $u' = 0.20$, $v' = 0.47$, $Y = 9$ (серый).

Когда важен учет абсолютных яркостей неизолированных стимулов, первые оговариваются дополнительно. Однако вместо величин абсолютных яркостей отдельных стимулов часто бывает удобнее указать либо яркость эталонного белого, либо абсолютную величину освещенности поверхностей.

Несмотря на то что результат восприятия неизолированных стимулов строго зависит от их относительной яркости, равномерная линейная шкала относительных яркостей не является визуально равномерной шкалой, например: визуальная разница между двумя образцами с относительными яркостями в 10% и 15% много больше, чем между образцами с относительными яркостями в 70% и 75%.

Решением означенной проблемы явилась величина, именуемая «*CIE 1976 светлота*» — L^*, которая вычисляется по уравнению:

$$L^* = \sqrt[3]{116(Y / Y_n)} - 16$$

где Y_n — это трехстимульное Y-значение эталонного белого стимула.

Равные приращения по L^*-шкале представляют примерно равные шаги приращения ощущения светлоты от неизолированных стимулов (фактически L^*-шкала — это аппроксимация шкалы Манселловской светлоты, равная примерно 10 манселловским значениям [см. раздел 14.24]). Следует отметить, что по белому эталону (у которого $Y = Y_n$) $L^* = 100$. При значениях Y/Y_n, меньших 0.008856, L^* вычисляется не по корнекубическому уравнению, а по линейной формуле:

$$L^* = 903.3(Y / Y_n)$$

Заметим, что L^* весьма схожа с CIE-коррелятом светлоты W^*, принятом в 1963 г. и рассчитываемым по уравнению:

$$W^* = 25\sqrt[3]{100(Y/Y_n)} - 17,$$

и когда $Y_n = 100$, то:

$$L^* = W^* + 1 - \sqrt[3]{0.0086Y}$$

Y-трехстимульные значения всегда рассчитываются так, что $Y = 100$ именно по идеальному отражающему рассеивателю, тогда как L^*-значения рассчитываются исходя из того, что $L^* = 100$ по любому эталону, выбранному в качестве белого (CIE, 1986).

8.8.1 Пространство CIELUV и уравнение цветовых отличий

Итак, можно подумать, что переменных u', v' и L^* вполне достаточно для колориметрической спецификации неизолированных цветовых стимулов. Однако же имеют место еще два фактора, которые следует учитывать:

— восприятие неизолированных стимулов зависит не только от яркости их окружений, но также и от их цветности: если в нашем примере цветность стимулов принять равной не $u' = 0.20$, $v' = 0.47$, а, скажем, $u' = 0.24$, $v' = 0.52$, то при условии, что средняя цветность окружений будет вновь той же, что и у исследуемых стимулов, последние все равно будут восприниматься как белые или серые. Фактически результат восприятия неизолированных стимулов больше зависит от их цветности, отнесенной к таковой у окружений, нежели от абсолютной цветности. Следовательно, лучше пользоваться не u' и v', а $u' - u'_n$ и $v' - v'_n$, где u'_n и v'_n — это u' и v' белого эталона;

— при данном отличии цветностей величина отличий в цветовых ощущениях зависит от светлоты: чем светлее образцы, тем больше перцепционное отличие между ними (Wyszecki, 1963; Wyszecki и Wright, 1965).

Для учета описанных эффектов можно использовать следующие переменные:

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n)$$
$$v^* = 13L^*(v' - v'_n)$$

При умножении отличий в цветности на L^*, отличия по u^* и v^* становятся гораздо ближе к визуальным отличиям, чем $u' - u'_n$ и $v' - v'_n$. Коэффициент 13 используется для того, чтобы равные отличия по L^*, u^* и v^* более или менее соответствовали равным визуальным отличиям (CIE, 1986).

Расположив оси u^* и v^* в горизонтальной плоскости, а L^* — вдоль вертикальной оси, перпендикулярной этой плоскости (см. рис. 8.13), мы построим трехмерное *цветовое пространство* (или, как его еще называют, *цветовое тело*),[1] в котором равные отрезки любого направления будут представлять цветовые отличия с более или менее равными

---

[1] С сегодняшних позиций $L^*u^*v^*$-пространство нельзя назвать ни цветовым, ни колориметрическим: ось L^* — это шкала одного из атрибутов цветового ощущения (светлоты), тогда как оси u^* и v^* характеризуют хроматическое *воздействие* стимула на зрительную систему наблюдателя. Таким образом, $L^*u^*v^*$-пространство можно толковать как некую промежуточную систему между сугубо колориметрическим и сугубо цветовым пространствами. — *Прим. пер.*

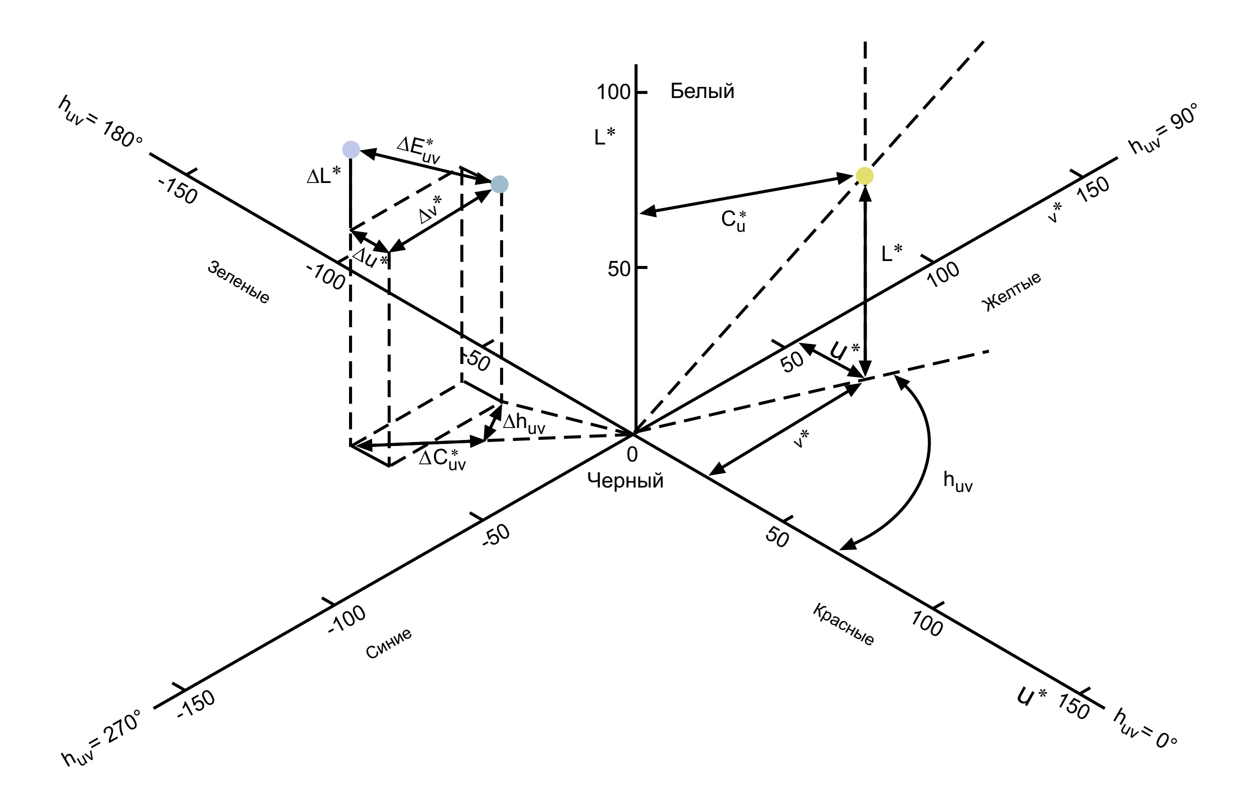


Рис. 8.13 $L^*u^*v^*$-пространство, в котором оси L^*,u^* и v^* взаимноперпендикулярны и в котором равные цветовые отличия представлены примерно равными расстояниями между точками.

визуальными величинами. Таким образом, если светлотно-хроматические отличия между двумя стимулами в системе L^*, u^*, v^* равны соответственно ΔL^*, Δu^*, Δv^*, то общее цветовое отличие — ΔE^*_{uv} — равно кратчайшему расстоянию между точками, представляющими эти стимулы в цветовом теле (см. рис. 8.13). Таким образом, общее цветовое отличие рассчитывается по уравнению:

$$\Delta E^*_{uv} = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]}$$

Данная величина именуется «*CIE 1976* ($L^*u^*v^*$) *цветовое отличие*» или «*CIELUV цветовое отличие*», а приведенная формула заменяет собой уравнение, принятое в 1963 г., в которой:

$$\Delta E = \sqrt{[(\Delta W^*)^2 + (\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2]},$$

где

$$U^* = 13W^*(u - u_0)$$
$$V^* = 13W^*(v - v_0),$$

а u_0 и v_0 — это u и v-величины белого эталона.

Отметим, что пространство данного типа более всего подходит цветному телевидению, поскольку в применяемых там диаграммах цветности аддитивные смеси стимулов лежат на прямых линиях, соединяющих точки цветностей этих стимулов. Ранее в телевидении применялась и предыдущая система CIE $U^*V^*W^*$ (Schroeder, 1979).

В текстильной промышленности широко используется формула цветовых отличий под названием ANLAB(40), основанная на работе Адамса и Никерсона. Уравнение задействует переменные L, A, B, а один из шкалирующих коэффициентов равен 40 (McLaren и Coates, 1970 и 1972; McLaren, 1971).

8.8.2 Пространство CIELAB и уравнение цветовых отличий

Уравнение расчета цветовых отличий, задействующее функцию манселловской светлоты (см. раздел 14.24), оказалось весьма громоздким и неудобным, поэтому CIE предложила аналогичную корнекубическую формулу (Faulhaber и Witherell, 1971), в которой вместо манселловской светлоты используется L^*-функция:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]}$$

где:

$$a^* = 500\left(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n}\right),$$
$$b^* = 200\left(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n}\right)$$

а X_n, Y_n и Z_n — трехстимульные XYZ-значения стимула, объявленного белым эталоном.

Величина ΔE^*_{ab}, именуемая «*CIE 1976* ($L^*a^*b^*$) *цветовое отличие*» или «*CIELAB цветовое отличие*», не имеет соответствующей равномерной диаграммы цветностей, но, разместив шкалы a^* и b^* на горизонтальной плоскости, а шкалу L^* на перпендикулярной этой плоскости вертикальной оси, можно построить трехмерное цветовое пространство, аналогичное тому, что показано на рис. 8.13 (CIE, 1986).

8.8.3 Слагаемые цветовых отличий

Формулы цветовых отличий данного типа (ΔE^*_{uv} и ΔE^*_{ab}) рассчитаны на те случаи, когда образцы располагаются, что называется, «сторонка к сторонке», то есть либо с очень маленьким зазором, либо вообще без него. Однако если образцы широко разнесены, то доля светлотного компонента должна быть уменьшена вдвое или даже более ($k\Delta L^*$, где $k \leq 0.5$), поскольку отличия по светлоте тогда становятся менее заметными (Judd и Wiszecki, 1975[1]).

Отметим, что цветовые пространства $L^*u^*v^*$ и $L^*a^*b^*$ не являются идеально равномерными, а связанные с ними формулы расчета цветовых отличий отражают перцепционные отличия лишь приблизительно. Сегодня исследователи активно разрабатывают более равномерные цветовые пространства, однако $L^*u^*v^*$-пространство все еще весьма популярно, и в частности тем, что имеет согласованную равномерную диаграмму цветностей; $L^*a^*b^*$-пространство также весьма популярно и активно используется в полиграфии, фотографии и текстильной промышленности.

В $L^*u^*v^*$-цветовом пространстве u^* и v^*-значения белого эталона равны нулю. Как видно из рис. 8.13, рост величины u^* выражает уход восприятия стимула преимущественно в красноту, понижение — в зелень, а рост v^* свидетельствует об уходе восприятия стимула в желтизну, понижение — в синеву.

---

[1] В русском переводе Д. Джадд, Г. Вышецкий «Цвет в науке и технике». М.: Мир, 1978. — *Прим. пер.*

В $L^*a^*b^*$-пространстве a^* и b^*-величины белого эталона равны нулю, и по направлениям изменения цветового восприятия a^* в целом схожа с u^*, а b^* — с v^*.

Отметим также, что относительное сходство пар осей по парам однозначных цветовых тонов (красный — зеленый, желтый — синий) — весьма полезное свойство описанных пространств.

Подчас компоненты цветовых отличий необходимо выразить в показателях насыщенности и цветового тона. Сие можно выполнить путем вычисления величин C^* (*CIE 1976 насыщенность*) и h (*CIE 1976 угол цветового тона*).

C^* вычисляется как:

$$C^*_{uv} = \sqrt{(u^{*2} + v^{*2})}$$

или

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})},$$

то есть C^* в цветовом пространстве — это кратчайшее расстояние между точкой, представляющей интересующий стимул, и осью L^* (рис. 8.13).

Величина h вычисляется как:

$$h_{uv} = \arctan(v^*/u^*) \text{ или } h_{ab} = \arctan(b^*/a^*)$$

В цветовом пространстве h_{uv} — это угол между двумя плоскостями, одна из которых задана L^*-осью и точкой, представляющей цветовые ощущения от интересующего цветового стимула, а другая — L^*-осью и осью u^*. Отношение h_{uv} к u^*- и v^*-осям показано на рис. 8.13. Отношения h_{uv} к a^*- и b^*-осям аналогичны.

Таким образом, цветовые отличия можно разложить на составляющие: светлотную, насыщенности и цветового тона (сумма квадратов которых равна квадрату ΔE^*) и вычислить с их помощью величину ΔH^*, именуемую *«CIE 1976 отличие по цветовому тону»*:

$$\Delta H^*_{uv} = \sqrt{[(\Delta E^*_{uv})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*_{uv})^2]}$$

или

$$\Delta H^*_{ab} = \sqrt{[(\Delta E^*_{ab})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*_{ab})^2]},$$

следовательно:

$$\Delta E^*_{uv} = \sqrt{[(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*_{uv})^2 + (\Delta H^*_{uv})^2]}$$

или

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{[+(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*_{ab})^2 + (\Delta H^*_{ab})^2]}.$$

Лучшее представление цветовых отличий можно получить делением величин $\Delta L^*, \Delta C^*_{ab}$ и ΔH^*_{ab} на $k_L S_L$, $k_C S_C$ и $k_H S_H$ соответственно, как это сделано в CMC-формуле (Clarke, McDonald и Rigg, 1984; McLaren, 1986; Hunt, 1998) и формуле CIE94, где:

$$S_L = 1$$
$$S_C = 1 + 0.045 C^*_{ab},$$
$$S_H = 1 + 0.015 C^*_{ab}$$

а k_L, k_C и k_H — коэффициенты, используемые исключительно в текстильной промышленности, где k_L=2.

Наконец, отметим, что сравнительно недавно была разработана наиболее продуманная и выверенная формула CIEDE2000 (детали см. в Приложении 5).

Для малых цветовых отличий в областях цветового пространства, удаленных от оси L^*, величина ΔH^* вычисляется так:

$$\Delta H^* = C^* \Delta h(\pi / 180)$$

В $L^*u^*v^*$-пространстве можно получить простой коррелят чистоты цвета, именуемый «*CIE 1976 u, v чистота цвета*» — s_{uv} и представляющий собой величину, пропорциональную расстоянию между позициями интересующего цветового стимула и эталонного белого стимула на $u'v'$-диаграмме цветностей:

$$s_{uv} = 13\sqrt{(u' - u'_n)^2 + (v' - v'_n)^2}.$$

Из приведенного уравнения следует выражение:

$$C^*_{uv} = L^* s_{uv},$$

демонстрирующее, что отличия по цветности между исследуемым стимулом и эталонным белым стимулом уменьшаются по мере уменьшения светлоты исследуемого стимула (за счет снижения насыщенности). Отметим, что, поскольку $L^*a^*b^*$-пространство не имеет диаграммы цветностей, рассчитать в нем простой коррелят чистоты цвета невозможно.

8.8.4 CIE-пространства и манселловская цветовая система

В обоих цветовых пространствах плоскости, параллельные плоскостям, заданным осями u^* и v^*, и a^* и b^*, — это плоскости постоянной L^*, то есть они несут на себе точки цветовых стимулов приблизительно постоянной светлоты.

В $L^*u^*v^*$-пространстве горизонтальные плоскости представляют собой $u'v'$-диаграммы цветностей. Это значит, что любая плоскость, на которую с помощью прямых линий, проходящих через начало координат, спроектированы точки цветового тела, будет представлять собой $u'v'$-диаграмму, умноженную на некий общий шкалирующий коэффициент.

Взаимоотношения коррелятов цветового тона, насыщенности и чистоты цвета в $L^*u^*v^*$-пространстве иллюстрирует рис. 8.14:

— вертикальные плоскости, на которых лежит ось L^*, представляют собой плоскости постоянного CIE-угла цветового тона (h_{uv});

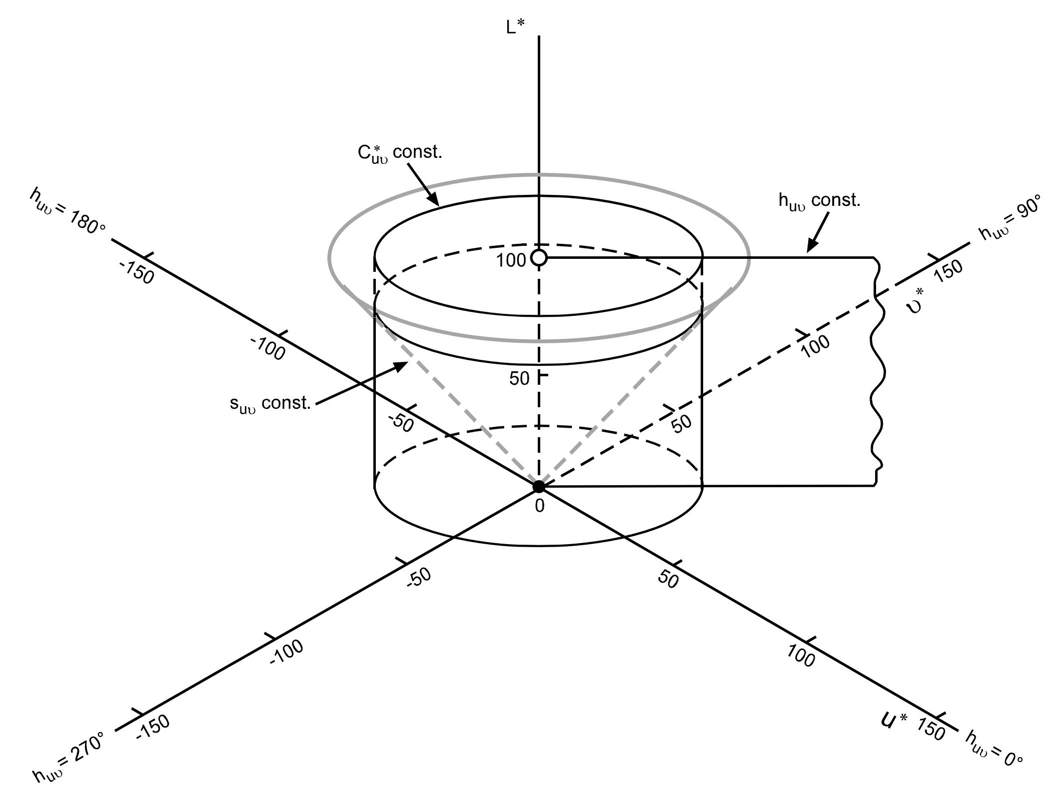


Рис. 8.14 Поверхности постоянных $h_{uυ}$, $C^*_{uυ}$ и $s_{uυ}$ в $L^*u^*v^*$-пространстве.

— концентрические цилиндры, у которых L^* является общей осью, — это поверхности постоянной CIE-насыщенности (C_{uv});

— конусы с осью L^* и вершиной в точке начала координат — это поверхности постоянной чистоты цвета (s_{uv}).

Сказанное применимо также и к $L^*a^*b^*$-пространству, за исключением коррелята чистоты цвета.

По общим показателям цветовые пространства схожи с манселловской цветовой системой:

— в манселловской системе светлота весьма схожа с L^* и располагается по вертикальной оси, на вершине которой позиционирован белый, а в основании — черный;

— плоскости постоянного манселловского цветового тона примерно схожи с плоскостями постоянной h и расположены так, что ось манселловской светлоты является общим краем плоскостей постоянного цветового тона, расположенных по полному кругу;

— манселловские образцы постоянной насыщенности, которые имеют более или менее постоянную величину C^*, расположены на постоянном расстоянии от оси манселловской светлоты.

Отметим, что численные значения C^* обычно в 5—10 раз больше значений манселловской насыщенности (соотношение зависит от цветового тона и светлоты, а также от того, какое из двух CIE-пространств имеется в виду). Численные значения L^*, как уже было сказано, примерно в 10 раз больше значений манселловской светлоты.

В манселловских цветовых атласах, которые являются физическим воплощением манселловской цветовой системы (см. рис. 7.0), образцы обычно располагаются на

страницах в соответствии с цветовым тоном (одна страница — один цветовой тон) и размещены в рядах и колонках: каждый ряд представляет какой-либо один уровень манселловской светлоты (кверху ряды светлее, книзу — темнее), а каждая колонка — какой-либо уровень манселловской насыщенности (слабонасыщенные ближе к серой оси — оси светлоты; высоконасыщенные — дальше от нее).

На рис. 8.15 и 8.16 показаны точки, образующие ряды и колонки на четырех типичных плоскостях $L^*C^*_{uv}$, отвечающих за четыре различных цветовых тона (при освещении страниц атласа стандартным С-осветителем). Мы видим, что точки на плоскостях располагаются рядами, практически равноотстоящими друг от друга по высоте (поскольку L^* и манселловская светлота очень схожи), но при этом дают некоторый разброс по колонкам (поскольку $L^*u^*v^*$-пространство является довольно грубым приближением к пространству манселловскому[1]).

Рис. 8.17 на $u'v'$-диаграмме цветностей демонстрирует позиции стимулов, воспринимаемых с манселловской светлотой 5, что соответствует 51.0 единице L^*; следовательно, данная диаграмма — это горизонтальное сечение $L^*u^*v^*$-пространства на уровне 51.0 по L^*.

Если бы манселловская система и $L^*u^*v^*$-пространство были идентичными друг другу, все линии на рис. 8.17 представляли бы собой равномерно распределенные концентрические кольца и прямые. Но поскольку совпадение систем лишь приблизительное, то многие линии постоянного манселловского цветового тона изогнуты.

$L^*a^*b^*$-пространство тоже всего лишь подобно манселловскому, но, в сравнении с $L^*u^*v^*$, оно лучше аппроксимирует его по ряду образцов (к примеру, низконасыщенных), при этом в отношении остальных (например, высоконасыщенных желтых или пурпурных) работает хуже.

Более или менее равномерное цветовое тело дает возможность эффективнее (чем с помощью диаграммы цветностей) представить хроматический охват (см. раздел 7.10) нефлуоресцирующих отражающих образцов: внешние линии рис. 8.15 и 8.16 демонстрируют границы этого охвата в $L^*u^*v^*$-пространстве при S_C-осветителе. Прочие вертикальные плоскости, на которых лежит L^*-ось, будут демонстрировать промежуточные участки цветового тела. Понятно, что максимальное значение C^*_{uv} будет лежать в диапазоне примерно от 120 до 180 (в зависимости от цветового тона) и будет достигать максимумов приблизительно при $L^* = 90$ по желтым, 50 — по синим и на промежуточных уровнях L^* по другим цветовым тонам.

В Приложении 2 дана таблица величин Y и L^* (наряду с другими данными), а также пример расчета некоего цветового отличия.

В случае образцов с тусклым окружением результирующее снижение визуального контраста можно учесть, заменив стандартное уравнение расчета L^* на уравнение:

$$L^*_{тускл.} = 116(Y / Y_n)^{1/3.75} - 16,$$

а при темном окружении — на уравнение:

$$L^*_{темн.} = 116(Y / Y_n)^{1/4.5} - 16$$

1 Когда сравнение проводится с $L^*a^*b^*$-пространством, возникают аналогичные, хотя и несколько отличающиеся в деталях отклонения.

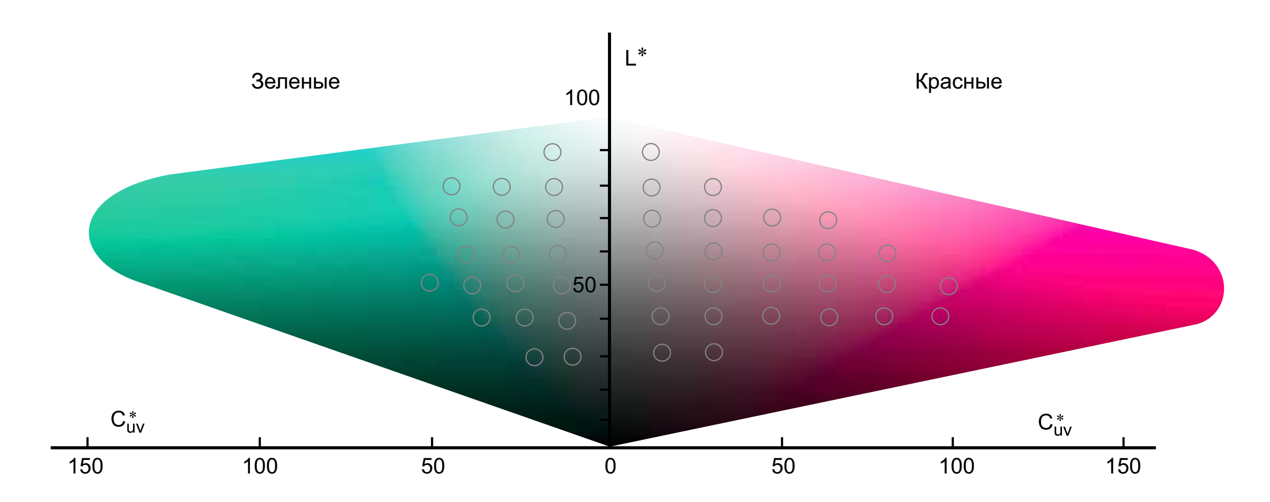


Рис. 8.15 Позиции образцов манселловского атласа со значениями манселловской светлоты 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и манселловской насыщенности 2, 4, 6, 8 (и т.д.) при манселловском цветовом тоне 5R и 5G на плоскости, образованной осями L^* и C^*_{uv}. Внешний контур обеих фигур демонстрирует типичный хроматический охват нефлуоресцентных отражающих материалов при стандартном С-осветителе.

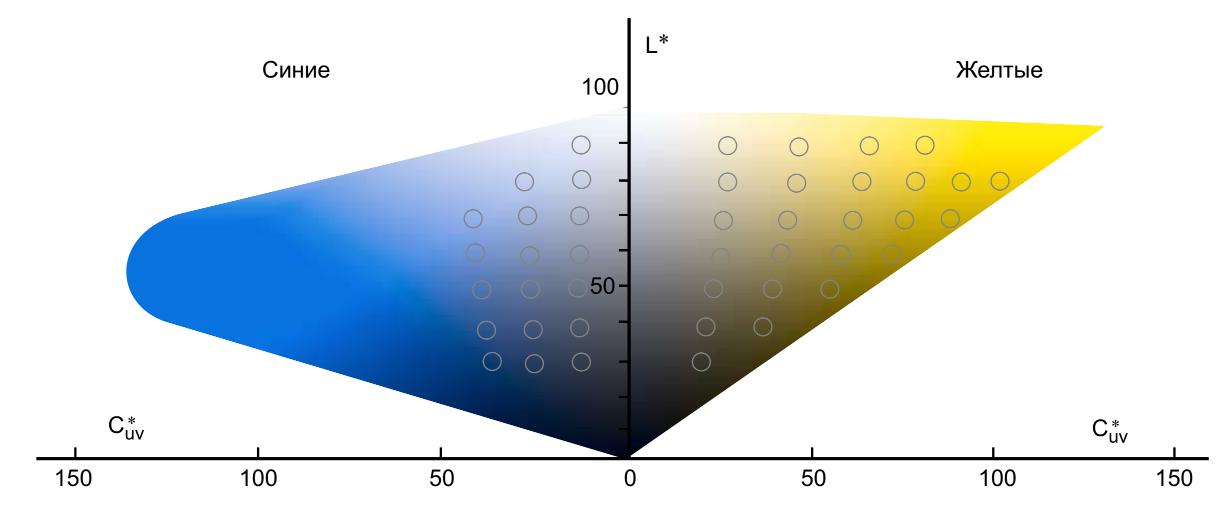


Рис. 8.16 То же по манселловским цветовым тонам 5Y и 5B.

Если при расчете u^*- и v^*-значений стимула вместо L^* используется $L^*_{темн.}$, то получаются модифицированные значения $u^*_{темн.}$ и $v^*_{темн.}$. Если темное окружение вызывает эффект т.н. *десатурации* (падения чистоты цвета) стимулов (см. раздел 6.8), то учет этого эффекта возможен за счет уменьшения коэффициента (13) в формулах расчета u^*- и v^*. Аналогично действуют в условиях тусклого окружения.

Отметим, что наиболее точный учет влияния тусклого и темного окружений на цветовое восприятие стимулов сегодня выполняют модели цветового восприятия CIECAM97s и CIECAM02 (см. гл. 35 и прил. 6).

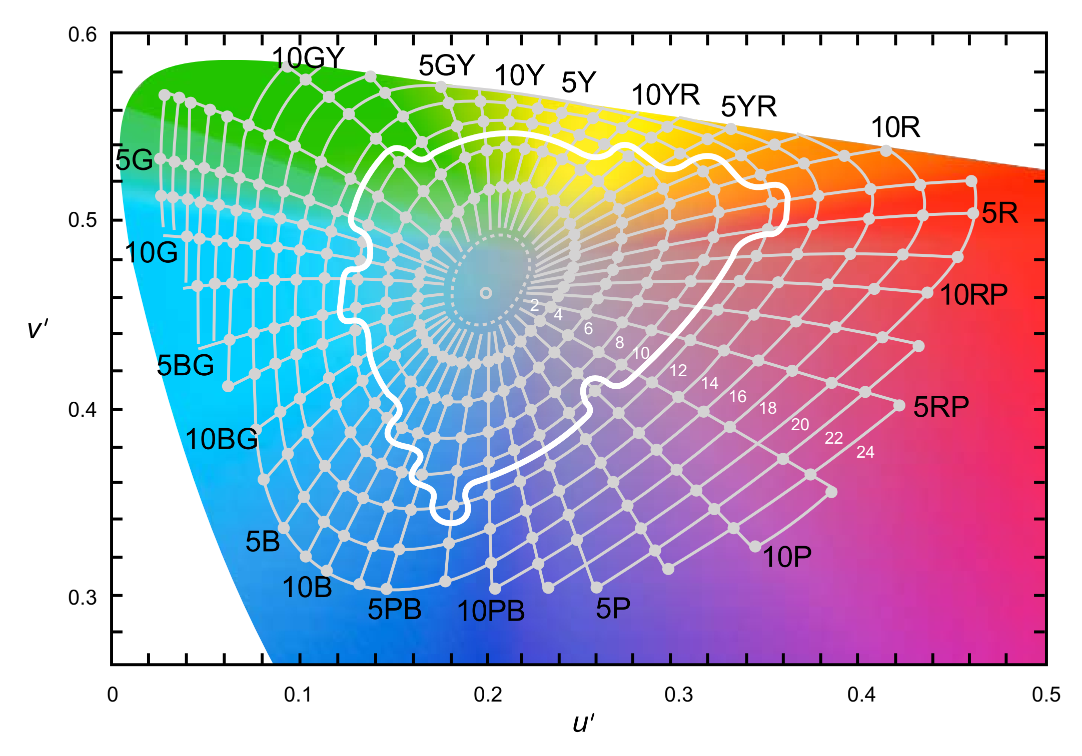


Рис. 8.17 Серыми точками на $u'v'$-диаграмме отмечены цветности всех манселловских образцов с манселловской светлотой 5 при цветовых тонах 2.5R, 5R, 7.5R, 10R (красные), YR (желто-красные), Y (желтые), GY (зелено-желтые), G (зеленые), BG (сине-зеленые), B (синие), PB (пурпурно-синие), P (пурпурные), RP (красно-пурпурные) и при манселловских насыщенностях 2, 4, 6, 8, 10, 12 и так далее до границ цветового охвата семейства стимулов, получаемых от нефлуоресцентных отражающих материалов. Сплошная неправильная белая линия, лежащая внутри спектрального локуса, демонстрирует охват цветностей образцов Манселловского атласа первой редакции (матовая поверхность) при манселловской светлоте 5.
И первое, и второе — при стандартном С-осветителе CIE.

8.9 СУБЪЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Несовершенство диаграмм цветностей и цветовых пространств (а также связанных с ними показателей) в контексте описания ими результатов цветового восприятия зрительных стимулов очень важно осознать. Так, несмотря на то, что CIE-светлота (L^*) представляет собой приемлемо равномерную шкалу ощущаемых светлот в неких усредненных условиях просмотра, фактические ощущения светлоты сильно зависят от реальных условий: к примеру, нейтральный стимул со светлотой, скажем, 50 по L^*, будет восприниматься как средне-серый, когда предъявляется на сером же фоне, однако на черном фоне он будет выглядеть светло-серым, а на белом — темно-серым. Сказанное иллюстрирует рис. 5.2.

Аналогичное рассуждение применимо к CIE-насыщенности (C^*), но, несмотря на то, что CIE-насыщенность представляет собой приемлемо равномерную шкалу ощущений насыщенности по неким средним условиям просмотра, фактические ощущения сильно зависят от условий реальных. К примеру, образец с CIE-насыщенностью, скажем, $C^* = 100$ будет восприниматься весьма полноцветным при освещении в тысячи люкс, но при освещенности в десятки люкс он будет иметь весьма низкую полноту цве-

та, а если уровень освещения опустится ниже одной десятой люкса, его полнота цвета станет стремящейся к нулю.

Описанные эффекты изучались различными способами, в частности с помощью методов т.н. *гаплоскопического уравнивания* и *субъективного цветового шкалирования*, которые мы будем обсуждать в следующих двух разделах.

В 35-й главе и в Приложении 6 мы покажем, что в прогнозировании результатов цветового восприятия в разных условиях просмотра весьма эффективно применяются т.н. *модели цветового восприятия*.

8.10 ГАПЛОСКОПИЧЕСКОЕ УРАВНИВАНИЕ

Восприятие цветовых стимулов правым и левым глазами и изменения этого восприятия, вызванные изменениями в фотометрической яркости и цветности фонов, а также в уровне освещения, по большей части независимы друг от друга. Так происходит потому, что адаптация зрения к перемене условий просмотра в основном проходит на уровне сетчатки каждого из глаз (тогда как диаметр их зрачков всегда меняется синхронно и определяется наиболее освещенным глазом; при этом роль зрачка в адаптации зрения более чем скромна). Относительная независимость адаптационных механизмов каждого из глаз позволяет адаптировать сетчатку одного глаза к одним условиям просмотра, другого — к другим, а затем, манипулируя стимулом, предъявленным одному глазу, визуально уравнять его с другим цветовым стимулом, предъявленным другому глазу.

Описанную методику исследования феноменов цветового восприятия еще в первой половине XX века начал активно использовать Райт (Wright, 1934 и 1946), а позднее к ней прибегали Винч и Янг (Winch и Young, 1951), Бурнхам, Эванс и Ньюхолл (Burnham, Evans и Newhall, 1952), вновь Бурнхам (Burnham, 1959), Хант (Hunt, 1950, 1952, 1953 [a] и 1965), Бренеман (Breneman, 1987), Мори, Собагаки, Коматсубара и Икеда (Mori, Sobagaki, Komatsubara и Ikeda, 1991).

Мак-Адам (MacAdam, 1956 [a и b]) применил сходный метод лишь к одному глазу, но при этом к соседним областям сетчатки.

На рис. 8.18 дана схема одного из гаплоскопических экспериментов, с помощью которого были получены данные, графически представленные на рис. 8.19:

— в правый глаз наблюдателя подавалась смесь красного, зеленого и синего уравнивающих стимулов, количества которых наблюдатель мог самостоятельно менять. Окружающим эту RGB-смесь и определяющим статус адаптации правого глаза являлся стимул, создаваемый стандартным B-осветителем с фотометрической яркостью 8.1 кд/м^2;

— левому глазу предъявлялся исследуемый стимул, а его окружением и, соответственно, регулятором статуса адаптации левого глаза также являлся стимул, создаваемый B-осветителем. При этом яркость последнего менялась за счет нейтральных фильтров разной плотности.

Восемь точек, наиболее удаленных от центра диаграммы рис. 8.19, представляют цветности восьми RGB-смесей, необходимых для создания «в правом глазу» ощущений, идентичных ощущениям «в левом глазу», последовательно вызванных восемью исследуемыми цветовыми стимулами. Последние окружены светом стандартного B-осветителя с фотометрической яркостью 1080 кд/м^2.

На диаграмме того же рисунка даны позиции цветностей стимулирующих RGB-смесей, которые нужно предъявить правому глазу для уравнивания с ощущения-

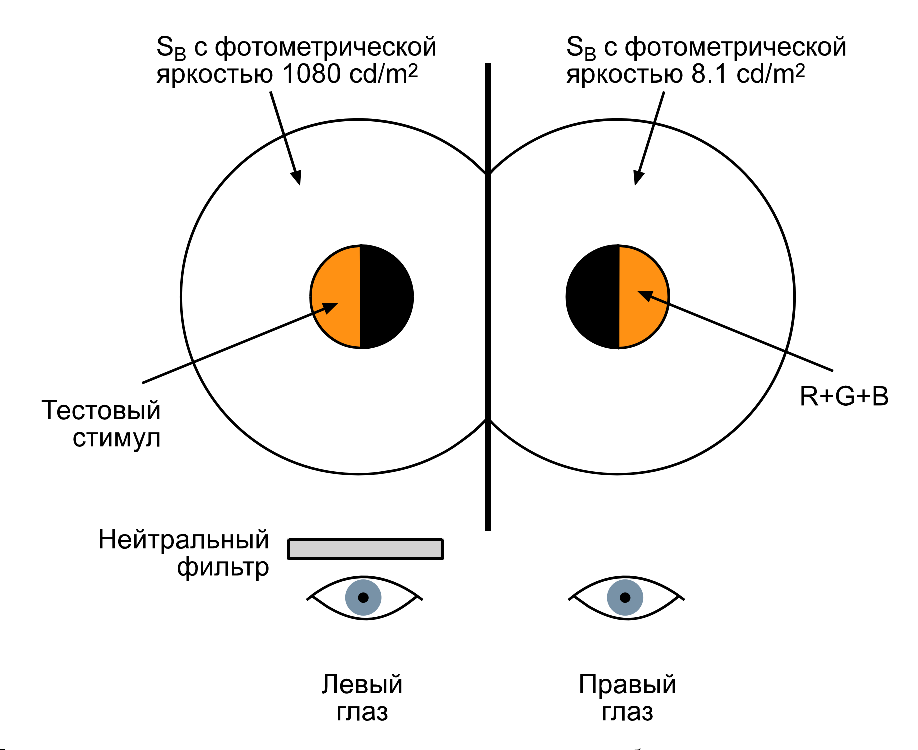


Рис. 8.18 Принципиальная схема эксперимента, в котором были получены результаты, показанные на рис. 8.19. В правый глаз (условия адаптации которого отличаются от условий адаптации левого глаза только по величине фотометрической яркости стимула) попадает лишь смесь красного, зеленого и синего уравнивающих стимулов.

Изменения в восприятии тестовых стимулов, возникающие за счет смены адаптации левого глаза, измеряются путем визуального уравнивания ощущений от тестового стимула с помощью трех уравнивающих RGB-стимулов, предъявляемых правому глазу.

ми, вызванными теми же восемью тестовыми стимулами, предъявленными левому глазу на шести меньших уровнях яркости окружения. Заметим, что на всех уровнях адаптации яркость исследуемых стимулов была равна яркости адаптирующего поля, но при темновой адаптации (Z-уровень) она была равной F.

Точки, представляющие цветности необходимых RGB-смесей по семи уровням адаптации для каждого исследуемого стимула, соединены с точками исследуемых стимулов прямыми линиями, что позволяет определить направление падения полноты цвета по мере падения общего уровня освещения и отследить выраженное изменение в полноте цвета стимулов при изменении уровня адаптирующей яркости.

На рис. 8.20 продемонстрированы результаты аналогичного эксперимента, при котором яркости тестовых стимулов были такими, что субъективная яркость этих стимулов была одной и той же на всех уровнях адаптации: мы видим, что по-прежнему имеет место выраженное падение полноты цвета при снижении уровня адаптирующей яркости, и, следовательно, эффект, показанный на рис. 8.19, возникает не только при снижении субъективной яркости.

На рис. 8.21 показаны результаты аналогичного эксперимента, но полученные уже при другом наборе измерений (Hunt, 1965): правый глаз был адаптирован к яркости окружения в 3600 кд/м^2 (при цветовой температуре 4000 K), а левый при этом воспринимал окружающее пространство беспрепятственно. Адаптирующая яркость по правому глазу была эквивалентна сцене со средним коэффициентом отражения около

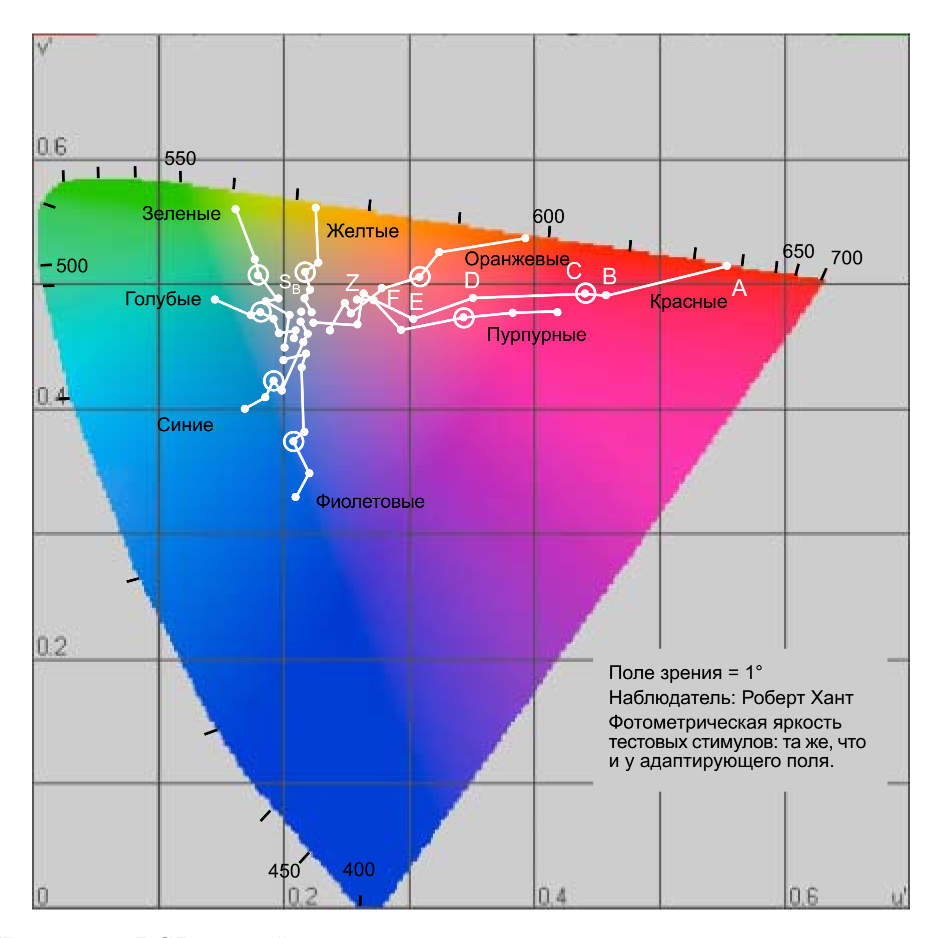


Рис. 8.19 Цветности RGB-смесей, которые в условиях адаптации по полю с фотометрической яркостью в 8 кд/м^2 и спектральным составом B-осветителя уравнивают восемь стимулов, предъявляемых при разных уровнях яркости такого же адаптирующего поля.

Точки A, B, C, D, E и F демонстрируют падение полноты цвета красного стимула по мере снижения его фотометрической яркости синхронно со снижением яркости адаптирующего поля от 1080 кд/м^2 (A) до 65 кд/м^2 (B), 8.1 кд/м^2 (C), 2.7 кд/м^2 (D), 0.32 кд/м^2 (E) и 0.075 кд/м^2 (F).

Точка Z относится к ситуации, при котрой фотометрическая яркость RGB-смеси равна 0.075 кд/м^2 (F), но яркость адаптирующего поля — 0.

Точки, отмеченные как «Оранжевые», демонстрируют аналогичные результаты по оранжевому тестовому стимулу, прочие точки — по оставшимся шести тестовым стимулам (Hunt, 1952 и 1953).

Если средний коэффициент отражения типичной сцены взять равным 20%, упомянутые уровни фотометрической яркости будут соответствовать следующим уровням освещенности:

A	16900 лк	Небо в дымке или свет в операционной
B	1020 лк	Пасмурный день или витрина магазина
C	127 лк	Сумерки или жилое помещение
D	42 лк	Сумерки или хорошо освещенная улица
E	5.0 лк	Слабо освещенная улица ночью
F	1.2 лк	Удесятиренный свет полной Луны

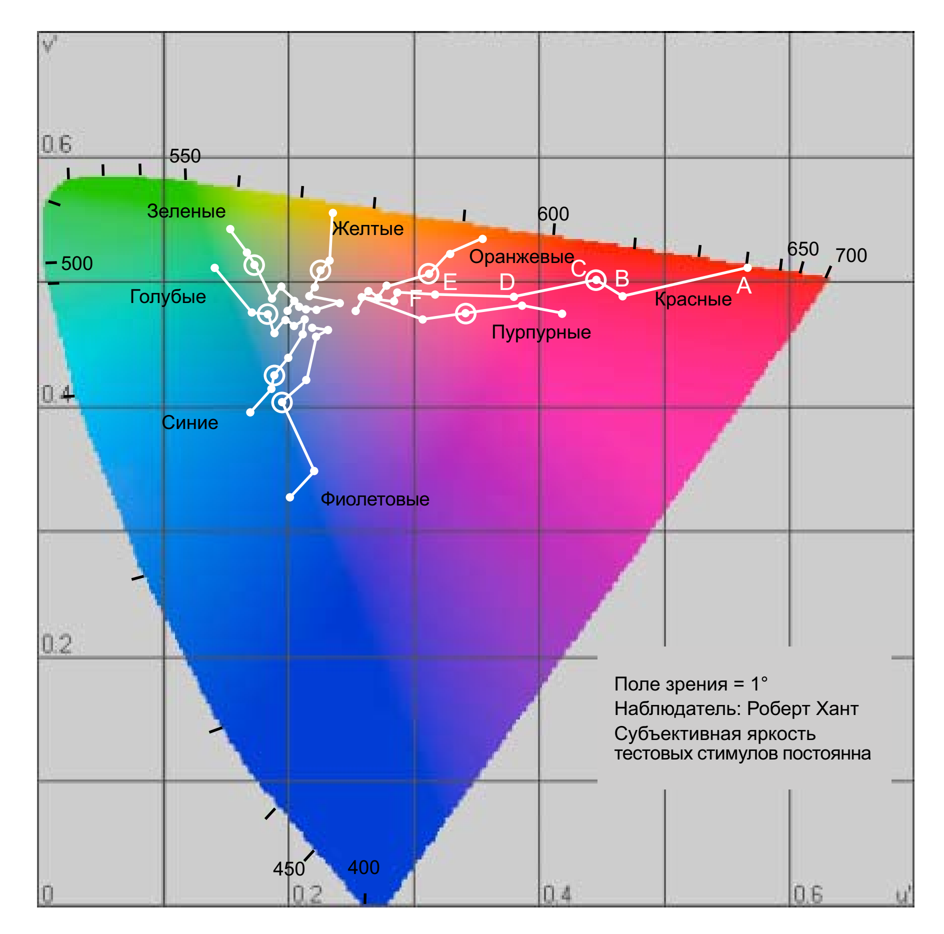


Рис. 8.20 То же, что и на рис. 8.19, но для тестовых стимулов при постоянной субъективной яркости, равной субъективной яркости окружения стимула, предъявляемого правому глазу.

20% и освещенностью порядка 50000 лк (ясный день), что дало возможность уравнивать цветовые стимулы, предъявляемые левому глазу в ситуации, эквивалентной яркому солнечному освещению.

Рис. 8.21 демонстрирует эффект от сочетанного изменения цветности и интенсивности адаптирующего света, воздействующего на левый глаз: стрелки указывают направление изменения восприятия различных цветовых стимулов при смене адаптации левого глаза с яркого солнечного света (освещенность сцены 50000 лк) на свет ламп накаливания (освещенность сцены 28 лк). Понятно, что поскольку в данном случае свет, адаптирующий левый глаз, в том числе продуцирует тестовые стимулы, и что при переходе от солнечного освещения к свету ламп накаливания цветности исследуемых стимулов будут меняться в зависимости от спектральных коэффициентов отражения образцов, — цвета воспринимаемых стимулов будут желтеть, а их полнота — уменьшаться.

Расчет величин, аналогичных L^*, показанный в заголовке рис. 8.21, также указывает на снижение субъективной яркости стимулов при предъявлении последних в условиях освещения лампами накаливания. Становится понятным, что адаптация в данном исследовании лишь частично зависит от желтизны и тусклости освещения при лампах накаливания и что, в дополнение ко всему, имеет место снижение полноты цвета стимулов.

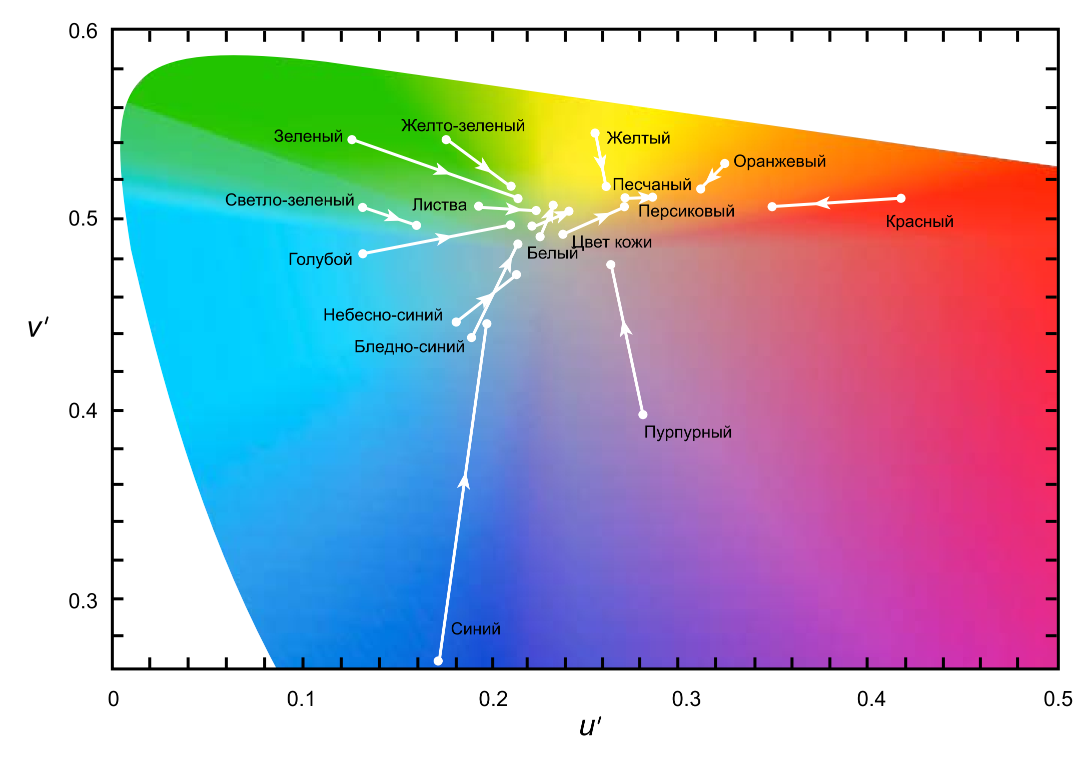


Рис. 8.21 Направления и степень изменения результатов восприятия пятнадцати различных тестовых стимулов при смене адаптации с яркого солнечного света при уровне освещенности в 50000 лк на свет ламп накаливания при освещенности в 28 лк. Параметры эталонного поля: фотометрическая яркость 3600 кд/м^2, коррелированная цветовая температура 4000 К (Hunt, 1965).

Изменения ощущения светлоты этих стимулов (рассчитывавшейся по уравнению $116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$) были следующими:

	Ощущение светлоты	
Цветовой стимул	**Солнечный свет**	**Лампа накаливания**
Белый	87	54
Желтый	79	45
Песчаный	68	36
Оранжевый	61	32
Светло-зеленый	61	24
Желто-зеленый	63	32
Персиковый	56	35
Небесно-голубой	56	19
Бледно-голубой	58	30
Цвета листвы	53	19
Красный	44	21
Пурпурный	40	20
Зеленый	41	17
Голубой	30	11
Синий	28	12

При оценке приведенных выше данных необходимо помнить, что диаграммы цветностей отражают взаимоотношения между стимулами и указывают на то, что соответствующие цветовые ощущения зависят от условий просмотра. Таким образом, несмотря на то, что рис. 8.21 можно использовать для описания эффектов изменения восприятия при изменении условий просмотра, — это всего лишь диаграмма цветностей, остающаяся диаграммой позиций стимулов (в данном случае — стимулов, предъявляемых правому глазу для уравнивания со стимулами, предъявляемыми левому), но не диаграммой величин цветовых ощущений.

8.11 СУБЪЕКТИВНОЕ ЦВЕТОВОЕ ШКАЛИРОВАНИЕ

Природа ощущений такова, что если их и можно измерить, то только путем т.н. *интроспекции*, т.е. *самоанализа*, который настолько сложен, что **колориметрия как наука об измерении характера и степени цветовых воздействий** основывается исключительно на отношениях между цветовыми *стимулами*, а ощущения, ими вызываемые, классифицируются лишь как равные или неравные по одному или нескольким параметрам.

Однако американский исследователь Стенли Смит Стивенс упорно продолжал разрабатывать методику, при которой наблюдатели определяли величины ощущений субъективной яркости и светлоты, и в итоге обнаружил, что отношения между фотометрической яркостью (или коэффициентом яркости) стимула и соответствующей субъективной величиной ощущения подчиняются степенному закону (Stevens и Stevens, 1963). Более того, ученый обратил внимание на то, что и иные отношения стимул/ощущение подчиняются степенному закону, например: сила звуковых колебаний/звук, электрическое воздействие/боль, повышение веса/тяжесть, рост температуры/жар, понижение температуры/холод.

Стивенс установил, что когда речь идет о фотометрической яркости зрительных стимулов, то (при отсутствии контрастных эффектов) величина ощущения (т.е. яркость субъективная) пропорциональна корню кубическому яркости фотометрической. Однако при наличии контрастных эффектов ощущение при изменении яркости стимула (или коэффициента его яркости) хотя и меняется быстрее, но точное значение ощущения, оставаясь зависимым от условий просмотра, не выходит при этом за рамки обычных корнекубических отношений.

Прочие исследователи подтвердили выводы Стивенса сходными результатами своих экспериментов (Hopkinson, 1956; Padgham и Saunders, 1966), в том числе автор данной книги получил аналогичную зависимость между физиологическим откликом и фотометрической яркостью (Hunt, 1953b).

Наконец, отметим, что величины, хорошо коррелирующие с отличиями по светлоте (такие, как *CIE 1976 светлота* — L^*), также хорошо коррелируют с экспериментально полученными шкалами величин субъективно установленной светлоты (Bartleson, 1975).

Наконец отметим, что предпринимались также вполне успешные попытки расширить описанные методики до уровня субъективного шкалирования цветового тона и полноты цвета (а также насыщенности и чистоты).

8.11.1 Шкалирование при постоянной адаптации и переменной стимуляции

В первой половине XX века Келли, чтобы получить результаты, показанные на рис. 8.22, использовал технику цветового именования изолированных стимулов, предъявляемых на темном фоне (Kelly, 1943). Однако следует помнить, что данные такого эксперимента могут оказаться изменчивыми, если наблюдатель адаптирован к какому-нибудь специфическому цветовому стимулу.

В аналогичных исследованиях, проведенные совсем недавно, при именовании четырех однозначных цветовых тонов использовались прилагательные «красный», «желтый», «зеленый» и «синий». Фиолетовые, пурпурные, розовато-лиловые, малиновые и розовые описывались затем как красно-синие или сине-красные, а оранжевые оттенки как желто-красные или красно-желтые. Волны видимого спектра, соответствующие высокочистым красному, зеленому, желтому и синему, менялись в зависимости от статуса адаптации наблюдателя и были определяемы этим статусом (Hurvich и Jameson, 1951; Thomson, 1954).

Исследователи просили наблюдателей прошкалировать ощущения цветового тона

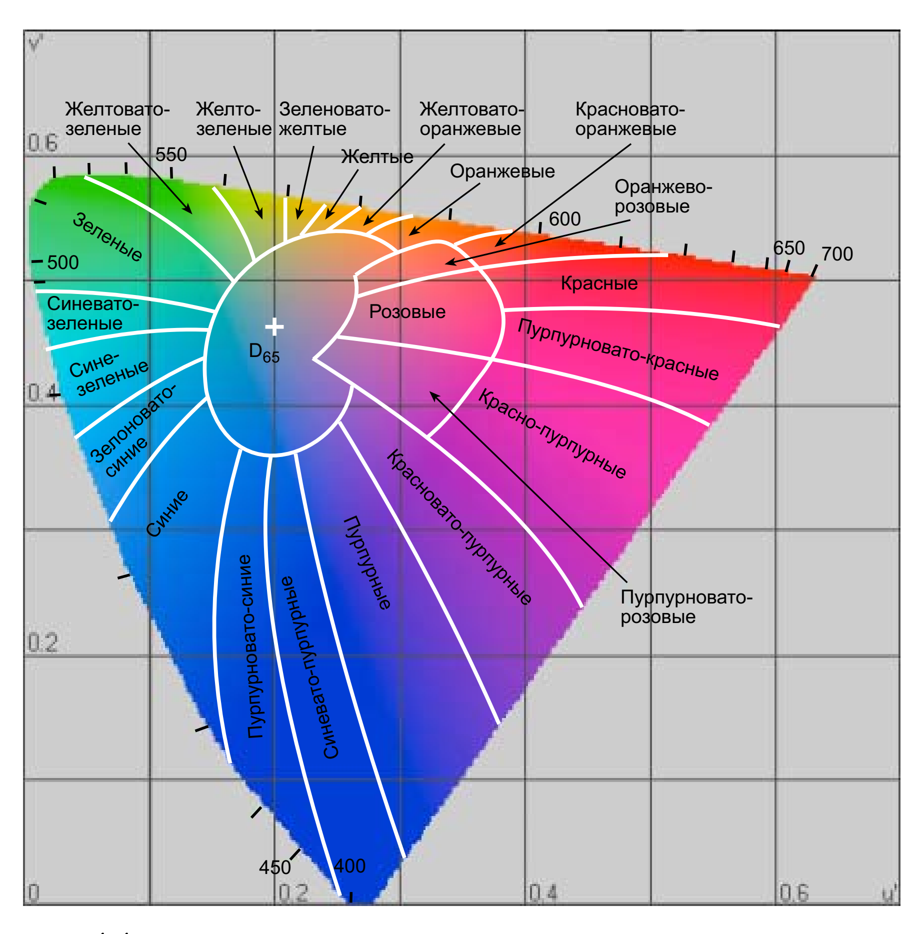


Рис. 8.22 Области $u'v'$-диаграммы и их названия, соответствующие различным цветовым тонам (совместно с центральной областью неименованных тонов) самосветящихся стимулов, предъявляемых на темном фоне (заимствовано из работы Келли по цветовому именованию световых потоков [Kelly, 1943]).

от разных стимулов, выражая свою оценку точным соотношением двух подходящих однозначных тонов, выбранных из четырех возможных (однозначных красного, желтого, зеленого и синего). В результате оранжевый прошкалировался как 60% красного и 40% желтого, пурпурный — как 80% синего и 20% красного и т.п.

Субъективное шкалирование светлоты неизолированных стимулов, как правило, проводят с использованием удобного диапазона чисел, к примеру, от 0 до 100 — 0 для черного и 100 для белого.

Третью переменную, относящуюся к неизолированным цветовым стимулам, например насыщенность, можно субъективно прошкалировать аналогичным образом, но было установлено, что наиболее подходящей является полнота цвета стимула (Pointer, 1980).

Описанную технику шкалирования использовал Луо с коллегами (см. Раздел 35.19.3).

Правомочность субъективного цветового шкалирования коричневого цвета при помощи четырех однозначных цветовых тонов — спорна (Rowe, 1973), но несомненно то, что коричневые оттенки можно вполне адекватно описать с помощью комбинаций однозначного красного и однозначного желтого цветовых тонов на достаточно низких уровнях светлоты (Bartleson, 1976).

Хельсон, Джадд иВаррен провели эксперимент по субъективному шкалированию цветовых стимулов в размерностях их цветового тона, светлоты и насыщенности (Helson, Judd и Warren, 1952): группой наблюдателей были прошкалированы 60 стимулов, полученных от отражающих образцов, которые освещались стандартным С-осветителем, после чего было выполнено шкалирование некоторых стимулов, полученных от тех же образцов, освещенных стандартным А-осветителем. Результаты эксперимента были выражены в виде комбинации объективных изменений в стимуле с субъективным изменением в адаптации наблюдателя.

Японскими исследователями во главе с Наятани были проведены эксперименты, аналогичные опытам Хельсона — Джадда — Варрена (Sobagaki, Yamanaka, Takahama и Nayatani, 1974; Sobagaki, Takahama, Yamanaka, Nishimoto и Nayatani, 1975).

8.11.2 Шкалирование при переменной адаптации и постоянной стимуляции

Альтернативным и менее сложным, чем вышеописанный, является подход, при котором стимулы остаются неизменными, а шкалируемые изменения в их восприятии вызываются только сменой адаптации наблюдателя. Для реализации данного метода необходимы стимулы, которые можно предъявлять наблюдателю при различном окружающем освещении, то есть изменение последнего не должно оказывать на стимул физического влияния. Сказанное означает, что исследуемые стимулы должны быть самосветящимися. С помощью данного метода Ровэ шкалировал стимулы, яркости которых вдвое превышали яркость окружений (Rowe, 1972). Поинтер, Энсель и Буллок провели серию аналогичных экспериментов, но использовали стимулы, яркость которых была равна половине яркости окружения (Pointer, Ensell и Bullock, 1977). Результаты были получены по D_{65} и А-адаптирующим полям с фотометрической яркостью, равной 100 кд/м^2 у обоих (см. рис. 8.23, на котором даны контуры постоянной полноты цвета со значениями 20, 40, 60, 80 и т.д.).

С целью прогнозирования изменений в цветовом восприятии, вызванных сменой адаптации наблюдателя, можно использовать сетку линий, подобную той, что показа-

на на рис. 8.23, к примеру: когда цветность стимула при стандартном D_{65}-осветителе равна $u' = 0.35$, $v' = 0.45$, результат его восприятия будет равным 70% однозначного красного плюс 30% однозначного синего при полноте цвета 80; если цветность этого же стимула при стандартном А-осветителе равна $u' = 0.40$, $v' = 0.52$, результат его восприятия будет равен 100% однозначного красного при полноте цвета 62, то есть тот же стимул при переходе к А-осветителю станет восприниматься более красным и менее полноцветным.

Заметим, что описанным путем мы получаем однозначный ответ на вопрос о якобы имеющей место цветовой константности зрительных стимулов (Bartleson, 1979) — подробнее см. гл. 34.

Стоит подчеркнуть, что сетка линий рис. 8.23 применима только к условиям просмотра описанного эксперимента, если же имеют место:

— иной уровень фотометрической яркости,

— разные уровни яркости при первом и втором состояниях адаптации наблюдателя,

— разный уровень яркости тестовых цветовых стимулов по отношению к яркости их окружения,

— частично затемненное окружение тестовых стимулов,

то, скорее всего, понадобятся иные пары сеток.

Как уже было показано, адаптация к цвету осветителя стремится быть:

— неполной в отношении белых и светло-серых стимулов,

— полной в отношении средне-серых,

— избыточной в отношении темно-серых и околочерных стимулов (Judd, 1940 и 1960).

Выдающийся американский ученый Ральф Эванс (Kodak Research Laboratories), изучавший условия, необходимые при исследовании ощущений от флуоресцирующих стимулов (Evans, 1959; Evans и Swenholt, 1967 и 1969; Hunt, 1982), показал, что существует некое переходное значение относительной яркости неизолированных стимулов, выше которого эти стимулы начинают восприниматься флуоресцирующими (а также продемонстрировал, что на более высоких уровнях яркости стимул интерпретируется как световой источник). Данное переходное значение можно назвать «надсерой точкой». Отметим, что когда отражающие объекты на цветовой репродукции воспроизводятся с относительными фотометрическими яркостями, превышающими их «надсерые точки», — объекты эти в изображении практически не читаются.

8.12 ФИЗИЧЕСКИЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ

Как уже было сказано в разделе 7.2, манселловская цветовая система, физически представляя собой набор раскрашенных карточек, субъективно шкалируется так, что равные шаги по этим карточкам, настолько, насколько возможно, соответствуют равным субъективным цветовым отличиям (благодаря чему система получила широкое признание как прекрасный метод цветовой спецификации).

При использовании цветовых стандартов, построенных на отражающих образцах, имеет место лишь одно неудобство — последние трудно защитить от износа и старения. Частично проблема решается с помощью т.н. *тинтометрической системы*, состоящей из прозрачных стеклянных образцов. *Тинтометр* задействует голубой (cyan), пурпурный (magenta) и желтый (yellow) стекла, калиброванные как шкалы с примерно одинаковыми визуальными приращениями по каждому образцу и обладающие исключительным постоянством физических показателей.

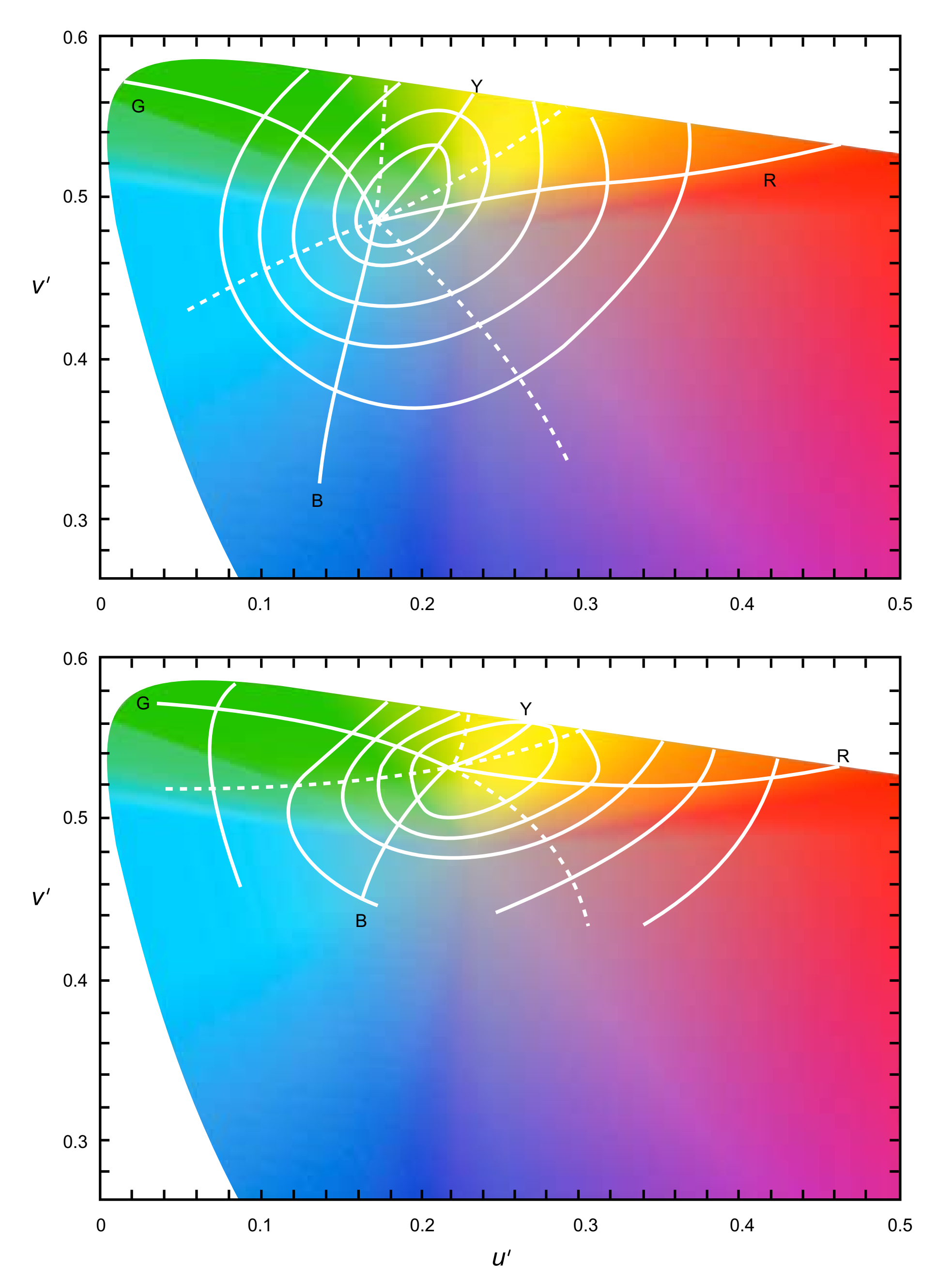


Рис. 8.23 Контуры постоянных цветового тона и полноты цвета, определенные Поинтером, Энселлем и Буллоком по стимулам одинаковой фотометрической яркости, равной половине яркости окружения. Наверху: при адаптации к стандартному осветителю D_{65}. Внизу: при адаптации к стандартному A-осветителю (Pointer, Ensell и Bullock, 1077).

Данные получены по 5 наблюдателям и усреднены.

Адаптирующие поля:

— фотометрическая яркость 110 кд/м^2;

— угол обзора 18°;

Тестовые стимулы:

— фотометрическая яркость 55 кд/м^2;

— угол обзора 2°;

Манселловская и тинтометрическая системы применяются сегодня очень широко, причем их ценность как физических воплощений портативных цветовых субстандартов была сильно повышена тем, что CIE опубликовала колориметрические спецификации их образцов (по манселловской системе см. Kelly, Gibson и Nickerson, 1943; по тинтометрической системе см. Schofield, 1939; Haupt, Schlater и Eckerle, 1972), дав возможность пересчета данных из обеих систем в CIE-систему и обратно.

Плюс к тому, в отношении манселловской системы была выполнена т.н. *сглаживающая калибровка* (Newhall, Nickerson и Judd, 1943), используемая сегодня для спецификации манселловских образцов.

Еще двумя популярными системами, использующими отражающие образцы, являются Swedish Natural Color System (NCS) — *Шведская система естественных цветов* (Swedish Standards Institution, 1979) и система *Pantone*, широко применяемая в полиграфии.

Отметим также, что в качестве колориметрического стандарта на отражение, обладающего очень высокой стабильностью физических показателей, может применяться керамическая плитка, в частности набор образцов, выпущенный Британской научной ассоциацией по керамике — BCRA (Clarke, 1969; Malkin и Verill, 1983).

8.13 БЕЛИЗНА

С целью характеризации разнообразных «белых» образцов, в частности бумаг, CIE предложила формулу расчета величины их белизны (W):

$$W = Y + 800(x_n - x) + 1700(y_n - y)$$

где Y — трехстимульное Y-значение образца; x и y — координаты его цветности; x_n и y_n — координаты цветности идеального отражающего рассеивателя. Величина хроматического компонента в белом образце (T_W) рассчитывается по уравнению:

$$T_W = 1000(x_n - x) - 650(y_n - y)$$

Чем выше значение W, тем выше белизна; чем выше положительное значение T_W — тем сильнее зеленый компонент; чем выше отрицательное значение T_W — тем выше красный.

Уравнения, рекомендованные для десятиградусного Стандартного наблюдателя, аналогичны, за исключением того, что в последнем уравнении вместо коэффициента 1000 используется коэффициент 900.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Bartleson, C.J., Color Res. Appl., 1, 181 (1976).
Bartleson, C.J., Color Res. Appl., 4, 119 and 143 (1979).
Bartleson, C.J., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 84, 613 (1975).
Billmeyer, F.W., and Gerrity, E.A., Color Res. Appl., 8, 90 (1983).
Breneman, E.J., J. Opt Soc. Amer., A4, 1115 (1987).
Burnham, R.W., J. Opt. Soc. Amer., 49, 254 (1959).
Burnham, R.W., Evans, R.M., and Newall, S.M., J. Opt. Soc. Amer., 42, 597 (1952).
CIE., Proc. 14th Session (Brussels), Vol. A, p. 95 (1960).
CIE., Proc. 15th Session (Vienna), Vol. A, p. 113 (1964).

CIE., Publication No. 15, Colorimetry (1971).
CIE., Publication No. 15.2, Colorimetry, 2nd Edn. (1986).
Clarke, F.J.J., Printing Technology, 13, 101 (1969).
Clarke, F.J.J., McDonald, R., and Rigg, B., J. Soc. Dyers and Colorists, 100, 128 (1984).
Eastwood, D., Die Farbe, 24, 97 (1975).
Evans, R.M., J. Opt. Soc. Amer., 49,1049 (1959).
Evans, R.M., and Swenholt, B.K., J. Opt. Soc. Amer., 57, 1319 (1967).
Evans, R.M., and Swenholt, B.K., J. Opt. Soc. Amer., 59, 628 (1969).
Faulhaber, M.E., and Witherell, P.G., Applied Optics, 10, 950 (1971).
Haupt, G.W., Schlater, J.C., and Eckerle, K.L., N.B.S. Technical Note 16 (1972).
Helson, H., Judd, D.B., and Warren, M.H., Illum. Eng., 47, 221 (1952).
Hopkinson, R.G., Nature, 178, 1065 (1956).
Hunt, R.W.G., J. Opt., Soc. Amer., 40, 362 (1950).
Hunt, R.W.G., J. Opt., Soc. Amer., 42, 190 (1952).
Hunt, R.W.G., J. Opt., Soc. Amer., 43, 479 (1953a).
Hunt, R.W.G., J. Phot. Sci., 1, 149 (1953b).
Hunt, R.W.G., J. Sci. Instrum., 31, 122 (1954).
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 55, 1540 (1965).
Hunt, R.W.G., Color Res. Appl., 2, 55 and 109 (1977).
Hunt, R.W.G., Color Res. Appl., 3, 79 (1978).
Hunt, R.W.G., Color Res. Appl., 7, 95 (1982).
Hunt, R.W.G., Measuring Colour, 3rd Edn., Fountain Press, Kingston-upon-Thames (1998).
Hurvich, L.M., and Jameson, D., J. Exp. Psychology, 41, 455 (1951).
Jones, A.H., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 77, 108 (1968).
Judd, D.B., J. Opt. Soc. Amer., 30, 2 (1940).
Judd, D.B., J. Opt. Soc. Amer., 50, 254 (1960).
Judd, D.B., and Wyszecki G., Color in Business, Science, and Industry, p. 317, Wiley, New York (1975).
Judd, D.B., MacAdam, D.L., and Wyszecki, G., J. Opt. Soc. Amer., 54, 1031 (1964).
Kelly, K.L., J. Opt. Soc. Amer., 33, 627 (1943).
Kelly, K.L., Gibson, K.S., and Nickerson, D., J. Opt. Soc. Amer., 33, 355 (1943).
Knight, R.E., J. Roy. Television Soc., 14, 39 (1972).
MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 17, 294 (1937).
MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 45, 500 (1956a).
MacAdam, D.L., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 64, 455 (1956b).
Malkin, F., and Verrill, J.F., Proc. CIE 20th Session, Amsterdam, Paper E37 (1983).
McLaren, K., J. Soc. Dyers and Colorists, 87, 159 (1971).
McLaren, K., The Colour Science of Dyes and Pigments, 2nd Edn., Hilger, Bristol (1988).
McLaren, K., and Coates, E., J. Soc. Dyers and Colorists, 86, 354 (1970).
McLaren, K., and Coates, E., J. Soc. Dyers and Colorists, 88, 28 (1972).
Mori, L., Sobagaki, H., Komatsubara, H., and Ikeda, K., CIE Proc. 22nd session Melbourne, Division 1, page 55 (1991).
Newhall, S.M., Nickerson, D., and Judd, D.B., J. Opt. Soc. Amer., 33, 385 (1943).
Padgham, C.A., and Saunders, J.E., Trans. Illum. Eng. Soc., 31, 122 (1966).
Pointer, M.R., Color Res. Appl., 5, 99 (1980).
Pointer, M.R., Ensell, J.S., and Bullock, L.M., Color Res. Appl., 2, 131 (1977).
Rowe, S.C.H., Ph.D. Thesis, The City University (1972).
Rowe, S.C.H., Colour 73, p. 391, Proc. 2nd AIC Congress, York 1973, Hilger, London (1973).

Schofield, R.K., J. Sci. Instrum., 16, 74 (1939).
Schroeder, A.C., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 88, 706 (1979).
Sobagaki, H., Yamanaka, T., Takahama, K., and Nayatani, Y., J. Opt. Soc. Amer., 64, 743 (1974).
Sobagaki, H., Takahama, K., Yamanaka, T., Nishimoto, A., and Nayatani, Y., Proc. CIE 18th Session, London, CIE Publication No. 36, p. 192 (1975).
Stevens, S.S., and Stevens, J.C., J. Opt. Soc. Amer., 53, 375 (1963).
Stiles, W.S., Phys. Soc. Year Book, p. 44 (1955).
Stiles, W.S., and Burch, J.M., Optica Acta, 6, 1 (1958).
Swedish Standards Institution, Colour Atlas, Swedish Standard SS 01-91-02, Stockholm (1979).
Thomson, L.C., Optica Acta, 1, 93 (1954).
Winch, G.T., and Young, B.M., G.E.C. Journal, 18, 88 (1951).
Wright, W.D., Proc. Roy. Soc. B., 115, 49 (1934).
Wright, W.D., Proc. Phys. Soc., 53, 99 (1941).
Wright, W.D., Researches on Normal and Defective Colour Vision, Kimpton, London, pp. 209–255 (1946).
Wyszecki, G., J. Opt. Soc. Amer., 53, 1318 (1963).

ЛИТЕРАТУРА

Evans, R.M., The Perception of Color, Wiley, New York (1974).
Hardy, A.C., Handbook of Colorimetry, The Technology Press, Cambridge, Massachusetts (1963).
Hunt, R.W.G., Measuring Colour, 2nd Edn., Ellis Horwood, Chichester, and Simon and Schuster, Englewood Cliff, NJ (1991).
Hunt, R.W.G., Measuring Colour, 3rd Edn., Fountain Press, Kingston-upon-Thames (1998).
Judd, D.B., and Wyszecki, G., Color in Business, Science, and Industry, 2nd Edn., Wiley, New York (1975).
Wright, W.D., The Measurement of Colour, 4th Edn., Hilger, London (1969).

9 КОЛОРИМЕТРИЯ СУБТРАКТИВНЫХ СИСТЕМ

9.1 ВВЕДЕНИЕ

Значение субтрактивных цветорепродукционных систем, воспроизводящих изображения за счет голубого (cyan), пурпурного (magenta) и желтого (yellow) фотокрасителей (или таких же печатных красок), трудно переоценить, поскольку системы эти весьма широко применяются в цветной фотографии и полиграфии. В данной главе мы познакомимся с колориметрическими свойствами субтрактивных систем цветовоспроизведения, но разговор о сложностях, возникающих при т.н. *автотипии*, т.е. формировании изображения из точек, отложим до 26 главы.

9.2 ОХВАТ ЦВЕТНОСТЕЙ СУБТРАКТИВНЫХ СИСТЕМ

9.2.1 Идеальные красители

Как было показано в 4-й главе, функция cyan-красителя состоит в поглощении света длинноволновой («красной») части видимого спектра, magenta-красителя — средневолновой («зеленой») части, yellow-красителя — коротковолновой («синей») части спектра. В идеале кривые спектральной передачи всех трех красителей должны быть такими, как кривые, показанные на рис. 9.1 сплошными линиями. Эти кривые таковы, что по каждой из длин волн два из трех красителей будут иметь 100% передачи, а третий — полностью поглощать световую энергию (такие красители часто называют «блок-красителями» или «идеальными красителями»).

Если полосы поглощения окажутся уже, чем показанные на рисунке, то на некоторых длинах волн свет не будет поглощаться, и, следовательно, в какой бы концентрации ни были смешаны три красителя — черный получить не удастся. Если полосы поглощения будут шире, результирующие цветовые стимулы окажутся темнее, чем следует.

Дабы воспроизводящие (кардинальные) стимулы, управляемые красителями, по отдельности воспринимались соответственно как красный, зеленый и синий (а не, допустим, оранжевый, голубой и фиолетовый, что сильно сузило бы цветовой охват системы), границы полос поглощения этих красителей должны находиться в районе 500 и 600 нм. Точные позиции оптимумов не определены, но по большинству оценок (см., например, Clarkson и Vickestaff, 1948) они находятся в районах 490 и 580 нм (что и показано на рис. 9.1).

Воспроизводящие стимулы, соответствующие идеальным красителям, будут представлять собой три столбика на участках от 580 до 700 нм, от 490 до 580 нм и от 400 до 490 нм, а их весовые доли будут зависеть от спектрального распределения энергии осветителя.

При вольфрамовой лампе накаливания с цветовой температурой 2856 K (стандартный A-осветитель) воспроизводящими (кардинальными) стимулами явятся стимулы

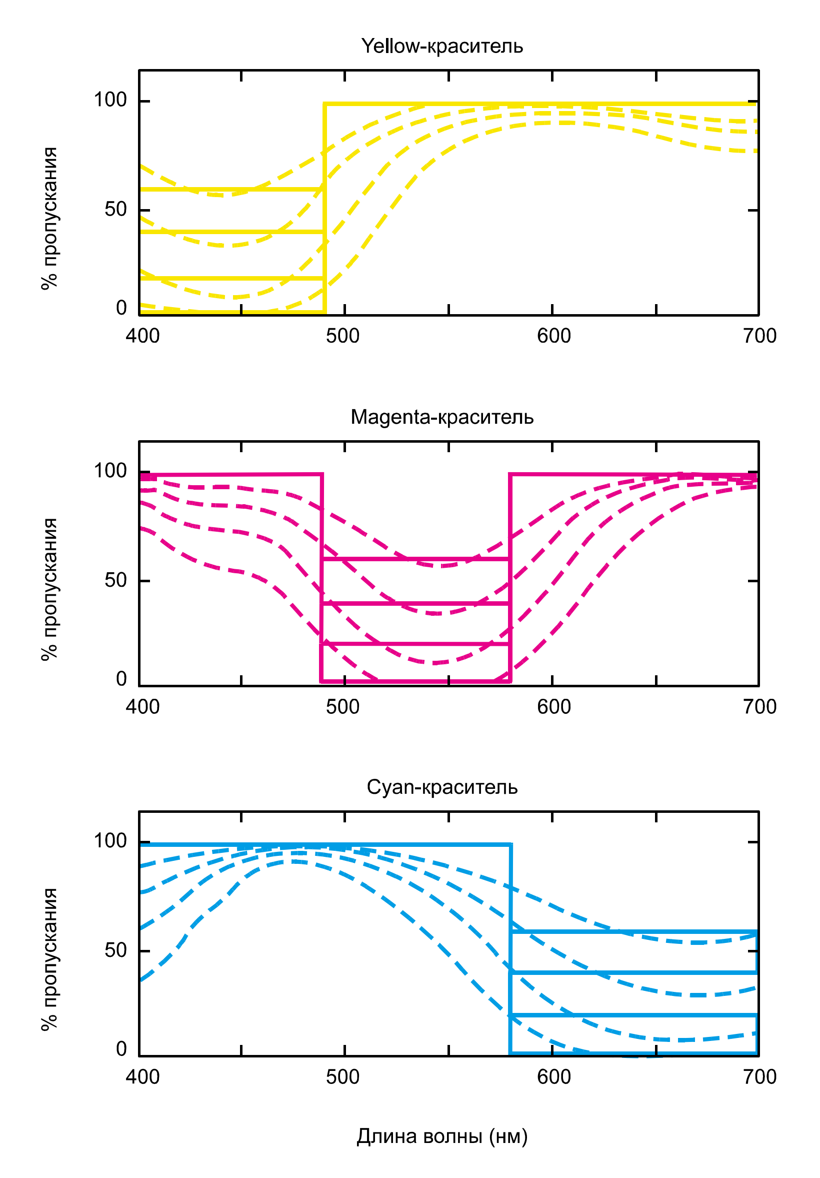


Рис. 9.1 Сплошные линии — кривые спектрального пропускания «идеальных» субтрактивных красителей (блок-красителей) в четырех разных концентрациях. Пунктирные линии — кривые спектрального пропускания типичных красителей (взято с рис. 4.1) в четырех разных концентрациях.

R_S, G_S и B_S, показанные на рис. 7.10. Позиции данных стимулов на $u'v'$-диаграмме цветностей — это центры тяжести соответствующих пар блоков после взвешивания их по источнику освещения и деления на величины v' (см. раздел 8.6).

Охват цветностей стимулов, которые воспроизведимы путем смешивания трех красителей, показанных на рис. 9.1, — это треугольник $R_SG_SB_S$ (рис. 7.10). Мы видим, что с помощью этих красителей невозможно воспроизвести стимулы весьма солидного диапазона цветностей (особенно стимулы сине-зеленой и пурпурной областей диаграммы). Ясно также, что субтрактивные цветорепродукционные процессы, построенные не на идеальных красителях, неспособны к воспроизведению цветовых стимулов высокой колориметрической чистоты. Однако важно напомнить, что процессы аддитивные теоретически ограничены треугольниками, подобными $R_TG_TB_T$, а практиче-

ски — треугольником, подобным $R_P G_P B_P$, который обычно немногим больше, чем треугольник $R_S G_S B_S$ (рис. 7.10).

Любопытно сравнить охваты цветностей, получаемые с помощью субтрактивных систем, с охватами систем телевизионных. На рис. 9.2 показаны охват идеальных красителей (при стандартном D_{65}-осветителе) в сравнении с охватом типичного бытового телеприемника при цветности опорного белого света равной цветности D_{65}-осветителя (что обычно для широковещательного цветного телевидения) и цветностях красного люминофора — $u' = 0.451$, $v' = 0.523$, зеленого люминофора — $u' = 0.121$, $v' = 0.561$ и синего — $u' = 0.175$, $v' = 0.158$ (BREMA PAL Working Party, 1969). Мы видим, что оба охвата очень похожи друг на друга.

9.2.2 Реальные красители

До сего момента мы рассуждали только в логике красителей, кривые передачи которых показаны на рис. 9.1. На практике таких красителей не существует и вместо них используются красители, типичные кривые передачи которых показаны на

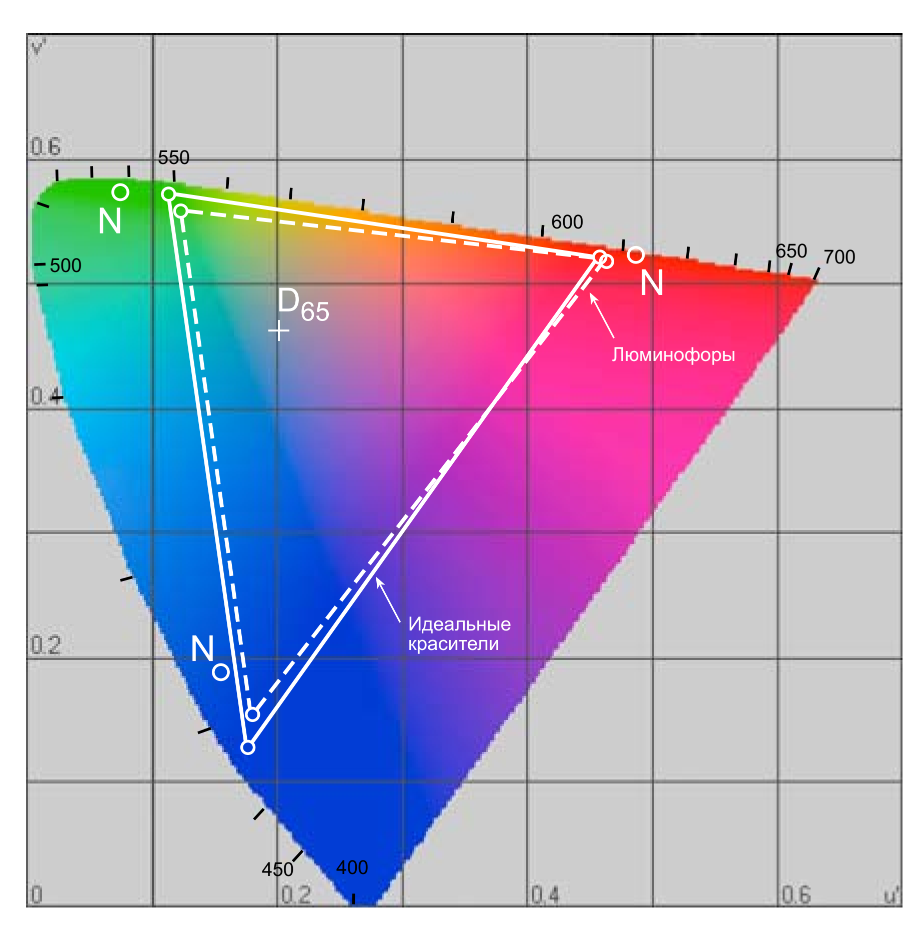


Рис. 9.2 Треугольник, образованный сплошной линией, представляет собой охват цветностей стимулов, которые можнопо лучить с помощью идеальных красителей (рис. 9.1) при стандартном D_{65}-осветителе. Треугольник, образованный пунктирными линиями, представляет собой охват цветностей стимулов, которые можнопо лучить за счет люминофоров типичного бытового телеприемника. Точки, помеченные «N», представляют исходные цветности люминофоров телевизионной системы N.T.S.C.

рис. 4.1 (пунктирные линии на рис. 9.1). По ряду параметров они отличны от «идеальных» кривых рис. 9.1, но колориметрически их наибольший недостаток состоит в том, что они не отдают 100% света на тех участках, где должны были бы отдавать. То есть имеет место т.н. «*паразитное поглощение*», которое проявляет себя при воспроизведении многих цветовых стимулов, особенно синих и зеленых, получающихся в итоге очень темными.

Заметим, что наклонные стороны полос поглощения при этом позволяют воспроизводить некоторые стимулы, лежащие за границами треугольника $R_S G_S B_S$. Объяснение тому находим на рис. 9.1: если концентрация красителей растет, наклонные стороны полос поглощения довольно сильно заостряют спектральные блоки красного, зеленого и синего кардинальных (воспроизводящих) стимулов: последние даже начинают походить на стимулы монохроматические (анализ данного эффекта см. у MacAdam, 1938, стр. 466).

Охват цветностей, достигаемый с помощью реальных красителей рис. 9.1 при использовании стандартного А-осветителя (2856 К), показан на рис. 9.3: мы видим, что он частично выходит за границы треугольника $R_S G_S B_S$ по голубому и пурпурному направлениям.

Отметим, что при просмотре слайдов и кинофильмов максимальные оптические плотности красителей снижает паразитная подсветка (примерно до 2.0), что ведет к снижению цветового охвата изображения. Когда же максимальные оптические плотности держатся в районе 3.0, можно достичь существенно большего охвата цветностей (пунктирная линия на рис. 9.3).

На рис. 9.4 в сравнении с телевизионным охватом, взятым с рис. 9.2, показан охват системы, достигаемый с помощью D_{65}-осветителя и реальных красителей (рис. 9.1) при их максимальных оптических плотностях порядка 2.0. Понятно, что обе системы очень близки друг другу как по охватам цветностей, так и по линиям главных цветовых тонов (радиальные линии). Однако в cyan-направлении слайд дает стимулы большей колориметрической чистоты, тем самым подводя охват системы ближе к общему охвату реальных сцен (пунктирная линия, взятая с рис. 7.17). Вместе с тем паразитное поглощение, дающее эффект затемнения воспроизводимых стимулов, ведет к уменьшению цветового охвата последних (о чем речь пойдет в следующем разделе).

9.3 СРАВНЕНИЕ ОХВАТОВ

Уменьшение цветового охвата, вызываемое паразитным поглощением, невозможно продемонстрировать на диаграмме цветностей, поскольку на ней не видны уровни относительных яркостей стимулов, лежащих в этом охвате. Наиболее правильным путем демонстрации полного цветового охвата является показ диапазона цветностей на различных уровнях яркости, взятых относительно фотометрической яркости некоего белого эталона, что и было выполнено японским исследователем Ота, который наряду с изучением паразитного поглощения исследовал эффекты формы и ширины полос рабочего поглощения красителей (Ohta, 1971 [d], 1972 [a]).

Ученый установил, что у слайдов пик абсорбции должен лежать между 640 и 660 нм по cyan, между 530 и 540 нм по magenta и в районе 430 нм по yellow. Выяснилось также, что охват наиболее чувствителен к позиции пика magenta, нежели к позиции пиков cyan и yellow (Ohta, 1971 [a], 1971 [b]). Ота показал также, что у отражающих отпечатков цветовой охват меньше, чем у слайдов, построенных на тех же красителях, поскольку в результате внутренних переотражений в слоях фотобумаги возни-

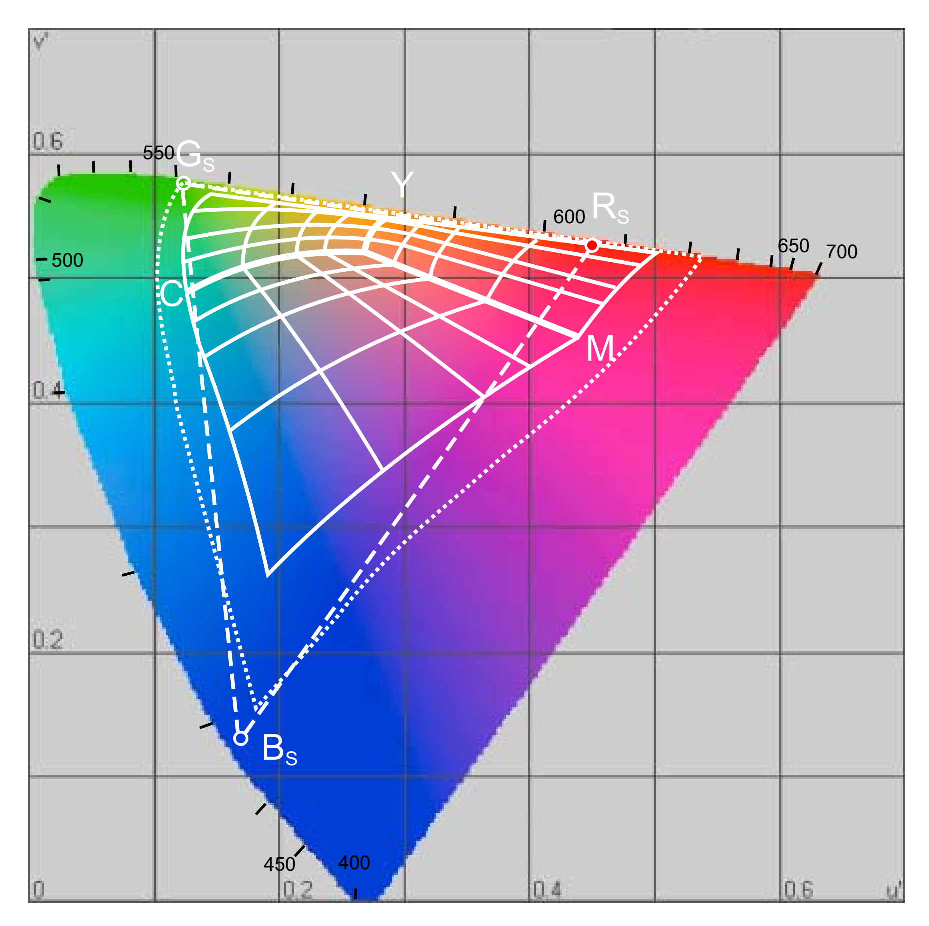


Рис. 9.3 Охваты цветностей стимулов, которые могут быть получены с помощью красителей, представленных на рис. 9.1, при вольфрамовой лампе накаливания с цветовой температурой 2856 К.

Пунктирная линия — охват цветностей стимулов, которые могут быть получены за счет идеальных красителей, управляющих кардинальными стимулами R_S, G_S и B_S.

Сплошные линии — охваты цветностей стимулов, которые могут быть получены при разных комбинациях трех типичных фактических красителей (рис. 9.1) в четырех вариантах их концентраций.

Точечная линия демонстрирует то, как вырастает охват цветностей при использовании дополнительной, пятой, концентрации, эквивалентной двойной наивысшей концентрации каждого красителя. Такие концентрации редко встречаются в изображениях, но цветности результирующих стимулов примерно описывают возможности современных субтрактивных фотопленок.

Итоговые пять вариантов концентрации дают примерно 56%, 31%, 10%, 1% и 0.1% пропускания по основным полосам поглощения красителей, что эквивалентно оптическим плотностям порядка 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 и 3.0.

кает т.н. *эффект оптического растискивания красителя*, иллюстрируемый рис. 13.3, а также поскольку от поверхности отпечатков отражается белый свет (Ohta, 1971 [c], 1971 [b]).

Еще одним способом представления полного цветового охвата системы является использование трехмерного цветового тела (Yule, Pearson и Pobboravsky, 1968; Pearson, Pobboravsky и Yule, 1968), для чего наиболее подходящим является пространство CIE $L^*u^*v^*$ (эталонный белый выбирается произвольно, из соображений удоб-

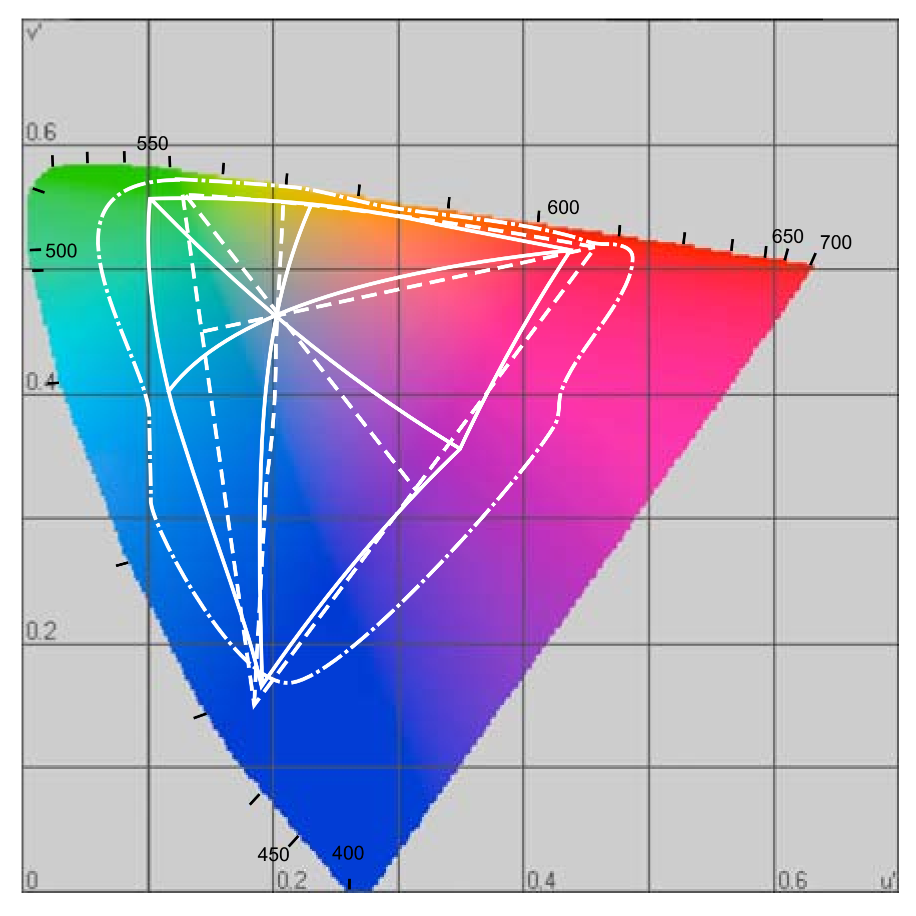


Рис. 9.4 Сплошные линии — охваты цветностей стимулов, которые можнопо лучить при стандартном D_{65}-осветителе и красителях типичной фотопленки (с максимальными оптическими плотностями порядка 2.0 по основным полосам поглощения этих красителей) при разных сочетаниях их концентраций.

Пунктирные линии — охваты цветностей стимулов, которые можнопо лучить с помощью люминофоров типичного домашнего телеприемника.

Точечно-пунктирная линия — максимальный охват цветностей реальных сцен.

ства) и что показано на рис. 9.5, где коррелят насыщенности (C^*_{uv}) отложен по оси абсцисс, а коррелят светлоты (L^*) — по оси ординат.

На рис. 9.5 даны три сечения цветового охвата, каждое из которых относится к двум из шести главных цветовых тонов: красному, зеленому, синему, голубому, пурпурному и желтому. Коль скоро L^*-ось расположена вертикально, а оси u^* и v^* лежат на горизонтальной плоскости, то данный рисунок демонстрирует вертикальные сечения цветового тела, всегда включающие в себя ось светлоты, но расположенные на разных углах цветового тона (иногда бывает полезным расположить оси u^* и v^* взаимноперпендикулярно и, следовательно, рассматривать цветовое тело сверху).

Уточним, что на рис. 9.5 показаны охваты цветностей фотокрасителей в сравнении с охватом телевизионных люминофоров (см. рис. 9.4): мы видим, что грани охвата люминофоров представляют собой плоскости, тогда как поверхности охвата фотокрасителей слегка искривлены, поскольку локусы главных цветовых тонов (представляющие на диаграмме цветностей изменение насыщенности при изменении концентрации красителей) не являются строго прямыми линиями.

На каждом из трех сечений L^*-ось отображает серую шкалу, в верхней позиции которой расположен эталонный белый стимул ($L^* = 100$), а в нижней — стимул, воспринимаемый как черный ($L^* = 0$). Горизонтальное удаление от L^*-оси дает меру отличия цветности стимулов постоянной фотометрической яркости от серого (что аналогично манселловской насыщенности). Понятно, что стимулы с наибольшими относительными яркостями в каждом из сечений охвата будут стремиться к вершинам этих сечений и что по мере роста насыщенности стимулов их позиции в охвате будут удаляться от L^*-оси. Прямые линии, радиально расходящиеся из нулевой точки, представляют позиции стимулов постоянной цветности, но переменной относительной яркости, то есть это линии примерно постоянной чистоты цвета.

Теперь сравним охваты, показанные на рис. 9.5 (сплошные линии — охват фотопленки; пунктирные — телеприемников): мы видим, что контуры охватов больше отличаются друг от друга, чем на рис. 9.4. Четко видно, что охват пленки больше в направлении голубых тонов, но также видно и то, что сказанное относится только к стимулам, дающим ощущения светлоты в диапазоне от 0 до 80 по L^*, тогда как на участке от 80 до 100 по L^* охват телевизионной системы в голубом направлении больше. Так происходит потому, что паразитное поглощение пленочного cyan-красителя не дает достичь ему высоких уровней относительной яркости.

Рис. 9.4 демонстрирует, что по красному, зеленому, пурпурному и синему направлениям охваты пленки и телевизионной системы весьма схожи между собой, однако по рис. 9.5 четко видно, что сие справедливо только в отношении стимулов низкой относительной яркости (то есть, дающих меньше $50L^*$ по красному, зеленому и пурпурному, а также меньше 20 L^* — по синему), тогда как по стимулам высокой относительной яркости телевизионный охват больше охвата пленки. И вновь отличия в охватах являются следствием паразитного поглощения света красителями пленки. Заметим, что в желтом секторе отличия между охватами весьма малы, но у пленки охват в этом направлении все же чуть-чуть больше.

Таким образом, цветное телевидение наглядно демонстрирует способность аддитивных систем воспроизводить цветовые стимулы практически всех цветовых тонов с большей, чем у пленки, относительной яркостью. Проще говоря, хороший цветной телевизор всегда может похвастаться отличным воспроизведением пастельных тонов. Схожесть цветовых охватов пленок и телевизионных систем на меньших относительных яркостях скорее теоретическая, чем практическая: шум и блики в большей степени способствуют уменьшению охвата телесистемы, нежели фотопленки.

На рис. 9.6 показаны те же сечения охвата, что и на рис. 9.5, но охват телесистемы (пунктирная линия) теперь сравнивается с охватом идеальных красителей (сплошная линия). Мы видим, что охваты очень схожи между собой, поскольку отсутствие какого-либо паразитного поглощения у идеальных красителей позволяет воспроизводить с их помощью стимулы высокой относительной фотометрической яркости. Интересно, что в случаях, когда в телекиносистемах с электронным маскированием (см. раздел 23.13) используется кинопленка, эффекты паразитного поглощения нивелируются, и охват цветностей системы виртуально становится равным охвату цветностей люминофоров (пунктирная линия). Если паразитное поглощение света красителями позитивной пленки компенсировано с помощью специальных окрашенных присадок (см. раздел 15.4), то охват может достичь телевизионного, но просмотр в этом случае необходимо вести при источнике с такой цветностью, при которой хроматический сдвиг, вызванный такой присадкой, будет полностью компенсирован.

Следует отметить, что приведенные выше рассуждения применимы лишь к тем си-

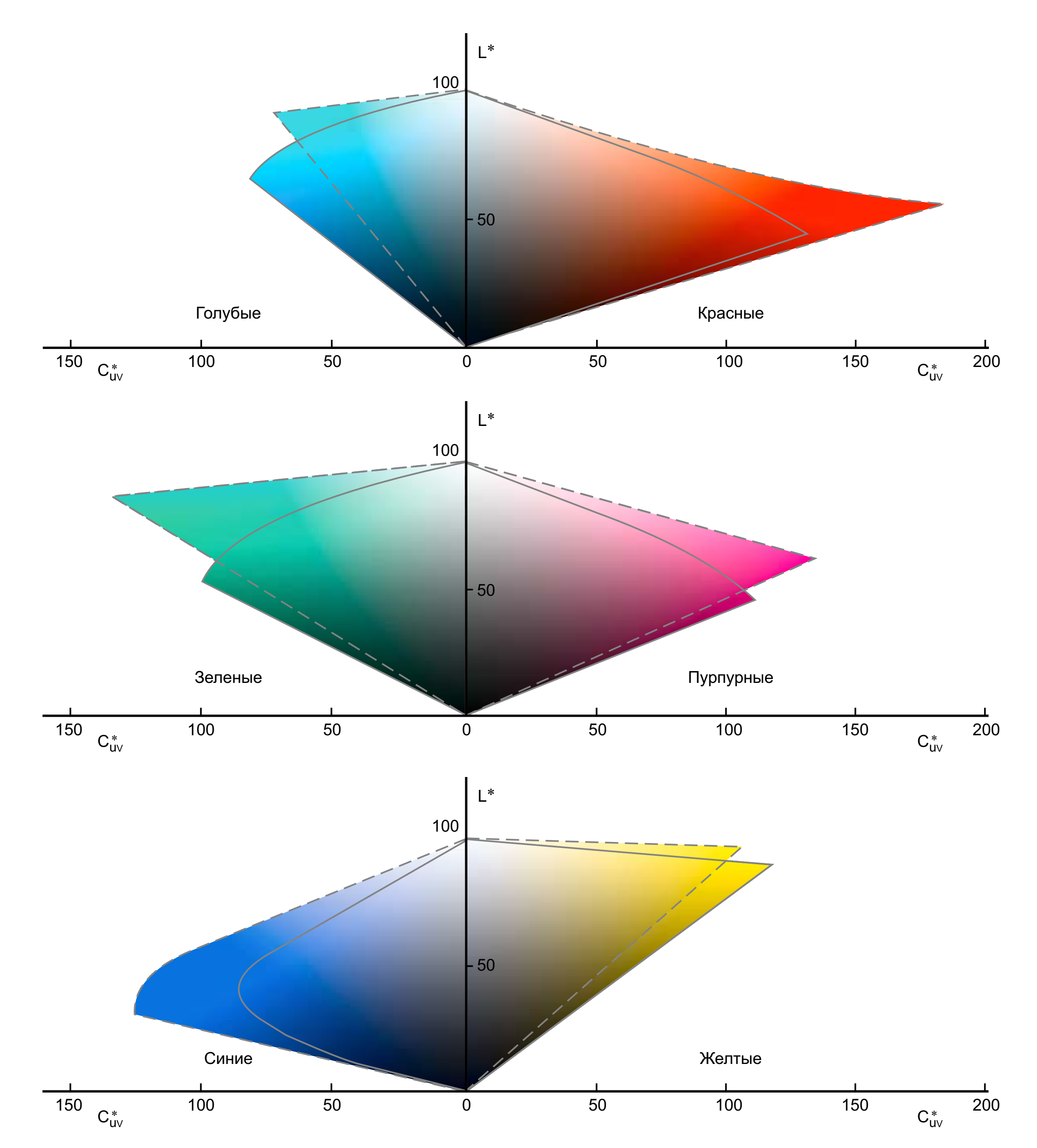


Рис. 9.5 Сравнение охвата цветностей красителей типичной пленки (сплошные линии) с охватом телевизионных люминофоров, взятого с рис. 9.4 (пунктирные линии), на шести главных цветовых тонах. Осветитель пленки и опорный белый телеприемника — стандартный D_{65}-осветитель. Максимальная концентрация красителей соответствует оптическим плотностям 2.0.

туациям, в которых телевизионные сигналы или оптические плотности красителей на фотопленке никогда не дают значение по L^* большее 100. В телевидении максимальные сигналы обычно соответствуют белому, но в цветных фотопленках белый воспроизводится обычно с оптической плотностью равной примерно 0.3. Безусловно, вполне достижимы и меньшие плотности, но нужно помнить, что за счет межслойного эффекта (см. раздел 15.5) оптические плотности по некоторым слоям могут оказаться меньше, чем у белых объектов сцены (даже у нефлуоресцентных материалов). На практике

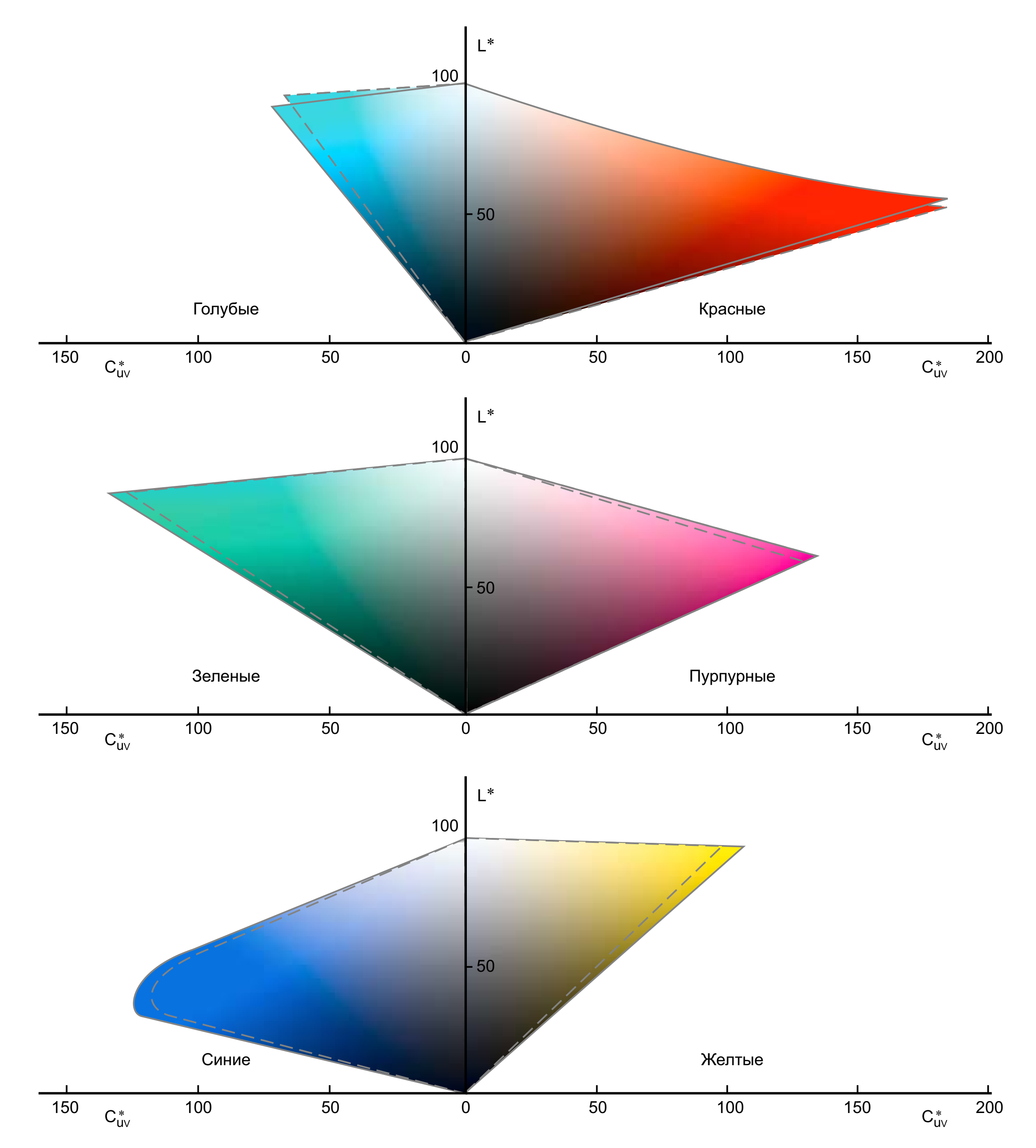


Рис. 9.6 Сравнение охвата цветностей идеальных красителей (сплошные линии) с охватом телевизионных люминофоров (пунктирные линии). Осветитель пленки и опорный белый телеприемника — стандартный D_{65}-осветитель. Максимальная концентрация красителей соответствует оптическим плотностям 2.0.

этот эффект возникает в основном у обращаемых пленок (Clapper, Gendron и Brownstein, 1973). Если межслойные эффекты окажутся такими, что будут полностью (или почти полностью) компенсировать паразитное поглощение, охват цветностей пленки будет больше похож на тот, что показан на рис. 9.6, нежели на рис. 9.5, у которого отличия в охватах пленки и телесистемы весьма малы по светлым стимулам, но много больше по голубым тонам за счет большего охвата пленки в этой области CIELUV-пространства.

9.4 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ, ПОСТРОЕННЫХ НА ИДЕАЛЬНЫХ КРАСИТЕЛЯХ

Предположим, что при регистрации сцены, освещенной S_A-источником, мы используем систему с идеальными красителями (рис. 9.1). Возникает вопрос: каковы должны быть спектральные чувствительности слоев фотоматериала (или аналогичных компонентов нашего процесса), чтобы цветовые стимулы были воспроизведены точно? Ответ: они, конечно же, должны быть трихроматическими кривыми Стандартного наблюдателя по кардинальным стимулам R_S, G_S и B_S (рис. 9.7 [a]), то есть удовлетворять условию Лютера — Айвса. При этом мы видим, что кривые будут иметь большие отрицательные участки, следовательно, спектральный локус (рис. 7.8) будет лежать далеко за пределами треугольника $R_SG_SB_S$.

В разделе 7.4 мы показали, что не существует удовлетворительного способа внедрения в фотографическую систему адекватных отрицательных чувствительностей. Сказанное означает, что не только те стимулы, что лежат за пределами треугольника $R_SG_SB_S$, начнут терять колориметрическую чистоту, но и все стимулы, позиции которых находятся внутри этого треугольника, также скорее всего будут воспроизведены некорректно.

Отметим, что идея внедрения отрицательных чувствительностей в фотоматериалы более или менее реализована в пленке Fuji Reala и некоторых других пленках, имеющих специальный сине-зеленочувствительный слой, который за счет межслойного эффекта влияет на слой красночувствительный (см. раздел 15.6). Однако межслойные эффекты вместо отрицательного экспонирования логарифмически понижают контрасты, и истинные отрицательные чувствительности таким путем все равно не получить.

Вместе с тем, если бы в фотографической системе и было возможным использовать эмульсии с отрицательными участками в кривых спектральной чувствительности, точное цветовоспроизведение в рамках $R_SG_SB_S$-треугольника все равно было бы невозможным, поскольку в дальнейшем по каждой эмульсии потребовалась бы корректировка ее тон-репродукционной кривой. Поэтому на практике все без исключения фотографические системы в какой-то степени искажают тонопередачу высоких светов и глубоких теней тоновой шкалы.

9.5 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ, ПОСТРОЕННЫХ НА РЕАЛЬНЫХ КРАСИТЕЛЯХ

Идеальные красители, обсуждавшиеся в предыдущих разделах, создают систему, в которой цветности результирующих кардинальных стимулов рассчитываются весьма просто и, следовательно, весьма просто определить соответствующий набор трихроматических кривых Стандартного наблюдателя. Однако, коль скоро реальные красители поглощают свет по каждой из третей спектра неравномерно, цветности результирующих кардинальных стимулов меняются по мере изменения концентрации красителей. Следовательно, у субтрактивных систем, использующих реальные красители, не существует одного набора теоретически корректных трихроматических кривых Стандартного наблюдателя.

Таким образом, в субтрактивных системах колориметрически точное воспроизведение всех стимулов (в рамках охвата этой системы) нельзя реализовать только за счет теоретически корректных кривых спектральной чувствительности камеры. Вместо этого должен применяться контекстный подход, при котором переменными в системе следует управлять так, что отклонения от колориметрически точного цветовоспроиз-

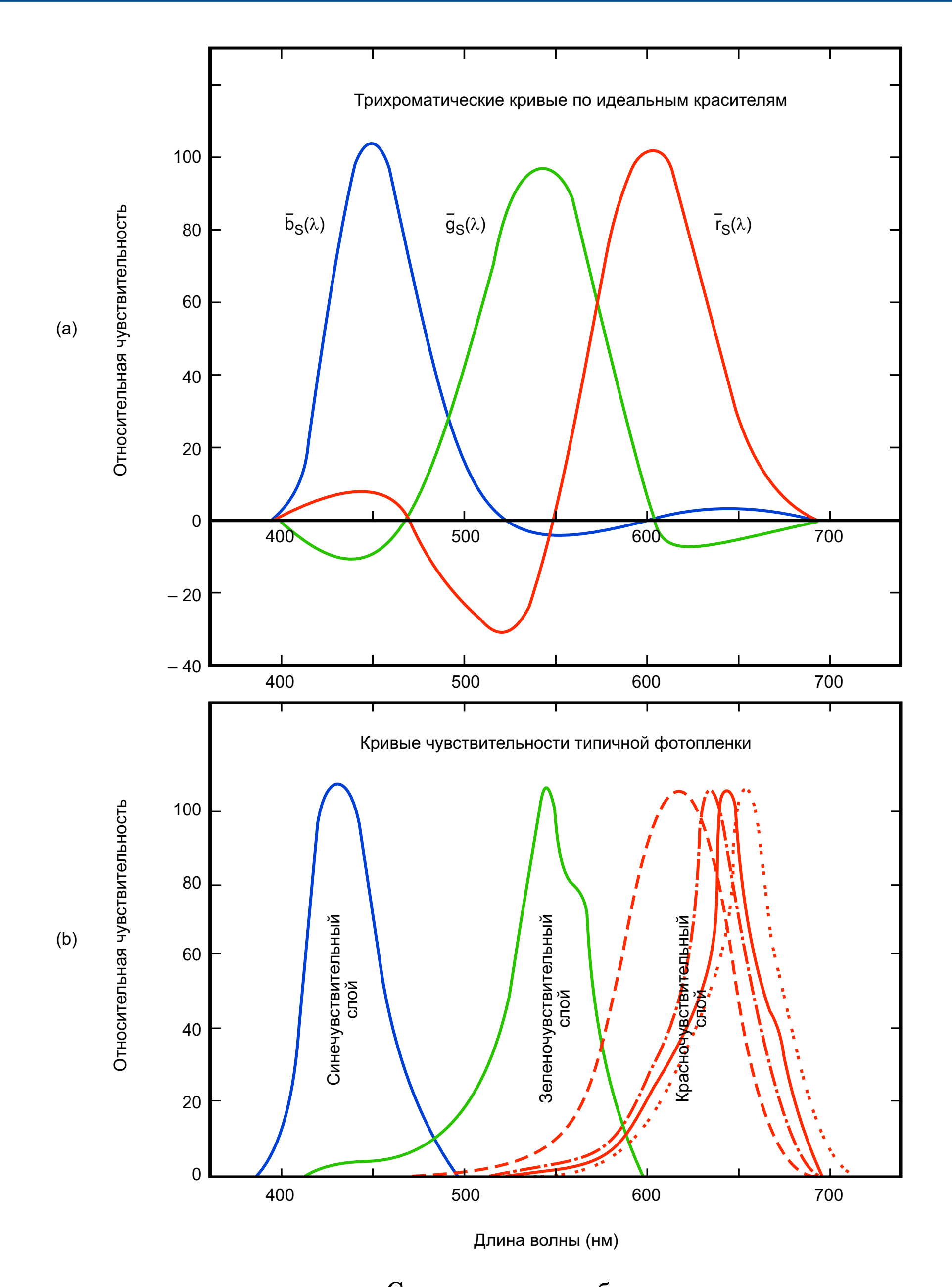


Рис. 9.7 (a) — трихроматические кривые Стандартного наблюдателя по «теоретическим» субтрактивным стимулам R_S, G_S, B_S рис. 7.8 и 7.10. (b) — спектральные чувствительности типичной фотопленки; пунктирные линии демонстрируют альтернативные варианты кривых красночувствительного слоя.

ведения минимизируются по тем цветовым стимулам, с которыми чаще всего сталкиваются на практике. К тому же, эти стимулы должны быть отобраны по критериям их относительной значимости, а также по относительной значимости различных видов погрешностей.

Практический выбор оптимального набора кривых спектральной чувствительности зависит от ряда требований, некоторые из которых противоречивы. Понятно, что желательно использовать кривые, идентичные трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя или их линейной комбинации (условие Лютера — Айвса), поскольку только

в этом случае метамерные объекты сцены (т.е. те, что по цвету выглядят одинаково, но имеют различные спектры) будут выглядеть одинаково и на репродукции, а те ее объекты, что по цвету выглядят разными, — всегда будут разными и на копии.

Трихроматические кривые Стандартного наблюдателя с отрицательными участками реализовать очень сложно, поскольку большинство фотографических эффектов, которые можно было бы использовать с целью получения таких участков (например, межслойные эффекты) ведут к *логарифмическому* вычитанию экспозиции, тогда как требуется просто вычитание. С другой стороны, строго положительные трихроматические кривые Стандартного наблюдателя, к примеру $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, показанные на рис. 8.6, имеют выраженные зоны наложения друг на друга, в результате чего получение удовлетворительной цветовой репродукции потребует либо т.н. высокоуровневого маскирования, либо применения межслойных эффектов (Hanson и Brewer, 1955). И то, и другое реализовать практически невозможно или по крайней мере очень сложно. Плюс к тому, широкий перехлест кривых чувствительности ведет к снижению экспонирующей эффективности света.

Таким образом, кривые чувствительности реальных фотографических систем стараются отстраивать так, чтобы они максимально отличались от каких-либо трихроматических кривых зрительной системы. Сказанное проиллюстрирует рис. 9.7 (b), на котором кривые чувствительности пленки сильно отличаются от трихроматических кривых Стандартного наблюдателя, показанных там же (или от каких-либо их линейных комбинаций, определяющих все остальные возможные наборы).

Используя комплекты полностью положительных трихроматических кривых с меньшими зонами перекрытия, можно уменьшить требования к уровням маскирования или степени межслойного эффекта, повысив тем самым эффективность экспонирующего света. Оборотной стороной здесь явится то, что некоторые метамерные стимулы сцены с «экзотическими», необычными спектральными распределениями, не окажутся визуально одинаковыми в ее изображении и наоборот: те, что в сцене по цвету выглядели разными, на изображении этой сцены могут оказаться одинаковыми. В частности, сильный сдвиг спектральной чувствительности красночувствительного слоя в сторону длинных волн (необходим в целях компенсации издержек большого отрицательного участка) приводит к сложностям в воспроизведении ряда стимулов, к примеру: однозначно-синие лепестки цветов на изображении начинают розовить (см. раздел 5.1), а некоторые зеленые поверхности передаются серыми или даже коричневыми. Данные искажения можно уменьшить за счет небольших сдвигов в красночувствительном слое (пунктирная линия на рис. 9.7 [b]), но в отсутствие высокоуровневого маскирования или межслойных эффектов такой прием приведет к тому, что зеленые объекты начнут желтить, красные станут вялыми, а цвет кожи европеоида (критичный в западной культуре) станет землисто-серым.

Следовательно, оптимальная кривая красночувствительного слоя — это некая компромиссная кривая (типичный вариант показан сплошной линией на рис. 9.7 [b]). Правда, у новейших пленок пик чувствительности по красночувствительному слою находится примерно в районе 620 нм. Таким образом, чтобы уйти от использования отрицательных участков (и, следовательно, межслойных эффектов и маскирования, необходимых при коррекции недочетов в спектральном поглощении красителей) используются максимально разнесенные друг от друга кривые спектральной чувствительности (Yule, 1971; Pearson и Yule, 1973).

Стоит отметить, что высокочувствительные цветные фотопленки обычно добирают чувствительность за счет того, что их кривые несколько шире, чем показанные на

рис. 9.7(b), благодаря чему поглощается большее количество экспонирующего света. При этом, как правило, колориметрическая чистота воспроизводимых стимулов несколько снижается (что требует коррекции особыми способами).

Величина, характеризующая то, насколько близко кривые чувствительности системы аппроксимируют трихроматические кривые Стандартного наблюдателя, известна как «*фактор колориметрического качества*» или «*q-фактор*» (*Colorimetric Quality Factor*) (Yule, 1967, стр. 138). Ограничением q-фактора является то, что в основе его расчета лежит тезис о равной визуальной значимости всех длин волн спектра, тогда как на практике одни могут быть намного важнее других; последнее указывает на необходимость отработки приемлемого метода волновой дифференцировки по данному критерию (Ohta, 1991).

9.6 ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Колориметрия субтрактивных стимулов была бы весьма изящной и легкой, если бы имелась возможность описывать аддитивные смеси кардинальных (уравнивающих) стимулов, регулируемых реальными красителями как красителями «идеальными». Ниже мы расскажем о двух попытках такого описания, предпринятых Мак-Адамом и Умбергером.

9.6.1 Схема Мак-Адама

Мак-Адам (MacAdam, 1938) показал, что, даже несмотря на зависимость цветности кардинальных стимулов от концентрации соответствующих реальных красителей, по крайней мере по некоторым из них возможно подобрать наиболее стабильный набор кардинальных стимулов, который будет соответствовать трем точно подобранным парным смесям этих красителей (т.н. *бинары*).

Внедрение такой системы потребует полного фотографического маскирования (см. гл. 15.8), но если использовать его в связке с кривыми спектральной чувствительности, то можно получить очень близкое приближение к теоретически корректной системе. Однако погрешности все равно будут возникать, и неизбежно потребуется их контекстная минимизация (сам Мак-Адам оптимизировал только цветности, тогда как необходима оптимизация по цветностям и относительной фотометрической яркости).

Отметим, что при изменении цветностей кардинальных стимулов форма трихроматических кривых Стандартного наблюдателя меняется не сильно, поэтому отличия между кривыми спектральной чувствительности типичных цветных фотоматериалов и любого корректного набора трихроматических кривых могут быть достаточно высоки, что показано на рис. 9.7.

В 1966 г. Мак-Адам показал, что цветные фотоматериалы можно производить со спектральными чувствительностями, аппроксимирующими положительные участки трихроматических кривых Стандартного наблюдателя по типичным аддитивным и субтрактивным кардинальным стимулам, а также, что такие материалы не будут воспроизводить синий как фиолетовый (что было свойственно всем цветным фотопленкам прошлых поколений — см. раздел 5.1). Также фотопленки, выполненные по Мак-Адаму, продемонстрировали, в сравнении со старыми, меньший сдвиг хроматического баланса при различных осветителях, но отличия в спектральной сенсибилизации слоев привели к некоторому снижению колориметрической чистоты воспроизводимых синих и красных стимулов. Любопытно, что ежели их колориметрическую

чистоту каким-либо способом восстановить (к примеру, за счет использования лучших красителей или за счет межслойного эффекта), то сдвиги хроматического баланса при различных осветителях вновь усиливаются.

9.6.2 Схема Умбергера

Говоря о свойствах спектрального поглощения красителей в контексте концепции Умбергера (Umberger, 1963), удобнее рассуждать в логике вариаций их оптической плотности по длинам волн, нежели в логике пропускания (набор из трех кривых спектральной плотности показан на рис. 9.8).

В прозрачных материалах оптическая плотность красителя по данной длине волны (D_λ) обычно точно пропорциональна концентрации этого красителя — c_1 (что не относится к отражающим отпечаткам, поскольку в них имеют место эффекты переотражения в краскослоях).

Таким образом, по слайдам мы можем написать:

$$D_\lambda = a_{1\lambda} c_1$$

где $a_{1\lambda}$ — это функция спектральной плотности при некоей единичной концентрации красителя. Следовательно, логарифмированный спектральный коэффициент пропускания (T_λ) будет равен:

$$\lg T_\lambda = -a_{1\lambda} c_1$$

И если теперь две оставшихся краски, при функциях спектральной плотности $a_{2\lambda}$ и $a_{3\lambda}$, добавить в концентрациях c_2 и c_3 соответственно, то результирующий спектральный коэффициент пропускания (T_λ) будет равен:

$$\lg T_\lambda = -a_{1\lambda} c_1 - a_{2\lambda} c_2 - a_{3\lambda} c_3$$

Затем, если изменить концентрацию одного из красителей с c_1 на c_1', то результирующий спектральный коэффициент пропускания (T_λ') будет равен:

$$\lg T_\lambda' = -a_{1\lambda} c_1' - a_{2\lambda} c_2 - a_{3\lambda} c_3$$

Далее. Две кривых спектрального коэффициента пропускания вместе с кривой спектрального распределения энергии какого-либо источника (E_λ), использованного при подсветке слайда, воспроизведут два цветовых стимула $E_\lambda T_\lambda$ и $E_\lambda T_\lambda'$. Разность между этими двумя выражениями ($E_\lambda T_\lambda - E_\lambda T_\lambda'$) — это спектральное распределение энергии цветового стимула P_1, который, будучи добавленным к $E_\lambda T_\lambda'$, воспроизведет стимул $E_\lambda T_\lambda$. Иными словами, стимул P_1 выступает в роли аддитивного стимула, управляемого красителем, концентрация которого изменилась от c_1 к c_1'.

Теперь основная наша проблема будет состоять в том, чтобы записать выражение $E_\lambda T_\lambda - E_\lambda T_\lambda'$ в удобном виде. При решении этого вопроса мы будем рассматривать сверхмалые изменения в c_1.

Продифференцировав $\lg T_\lambda$ по c_1, получим:

$$\frac{dT_\lambda}{T_\lambda \mathrm{d}c_1} = -2.3 a_{1\lambda},$$

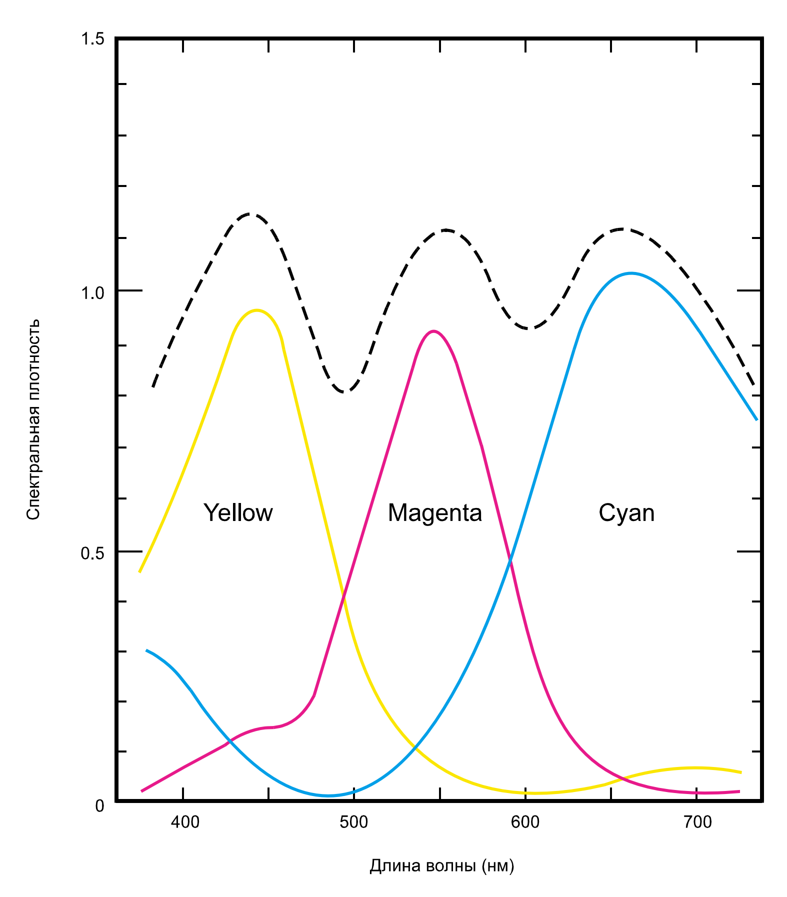


Рис. 9.8 Кривые спектральной плотности типичных cyan-, magenta- и yellow-красителей (рис. 9.1). Пунктирная линия демонстрирует общую функцию спектральной плотности всех трех красителей.

где $2.3 \approx \log_e 10$.

Однако, коль скоро при сверхмалых изменениях c_1-концентрации $\mathrm{d}T_\lambda = T'_\lambda - T_\lambda$, то

$$E_\lambda T_\lambda - E_\lambda T'_\lambda = -E_\lambda \mathrm{d}T_\lambda = 2.3 T_\lambda E_\lambda a_{1\lambda} \mathrm{d}c_1 .$$

Мы видим, что аддитивный стимул P_1 зависит от спектрального состава интересующего нас цветового стимула, то есть в конечном счете от спектрального коэффициента пропускания (T_λ) данного участка пленки. Следовательно, кардинальные стимулы, управляемые красителями субтрактивных систем, — *колориметрически нестабильны* (отметим также, что кардинальные стимулы имеют тенденцию к повышению своей колориметрической чистоты по мере роста концентрации красителя).

Если говорить о серых стимулах, то T_λ будет примерно постоянной по всей протяженности спектра и в первом приближении ее можно заменить на постоянную T_n:

$$E_\lambda T_\lambda - E_\lambda T'_\lambda = 2.3 T_\mathrm{n} E_\lambda a_{1\lambda} \mathrm{d}c_1 = k E_\lambda a_{1\lambda} \mathrm{d}c_1 ,$$

где k — постоянная величина. Суть стимула P_1 в этом случае становится очень простой:

его спектральное распределение энергии можно рассчитать, если кривую спектральной *плотности* ($a_{1\lambda}$) рассматривать как кривую *пропускания* условного аддитивного фильтра. Спектральное распределение, вычисленное таким способом ($E_\lambda a_{1\lambda}$), будет пропорциональным спектральному распределению энергии ($E_\lambda T_\lambda - E_\lambda T'_\lambda$) стимула P_1 (если же мы хотим уйти от вышеописанной аппроксимации и получить точное спектральное распределение, то необходимо идти через $T_\lambda E_\lambda a_{1\lambda}$).

Приведенное выше определение P_1 хоть и очень простое, имеет весьма ограниченную область употребления, поскольку применимо только к серым стимулам и при крайне малых изменениях в концентрации красителя. Однако, если теперь рассматривать T_λ не как спектральное пропускание равномерно окрашенного образца, а как интегральное пропускание света всей области изображения на слайде, приведенные выше аргументы хоть и остаются истинными, но все же становятся менее общими: некоторые равномерно окрашенные участки изображения будут оставаться серыми, но интегральный свет от всего слайда чаще всего будет лишь приблизительно серым. Спектральное распределение $E_\lambda a_{1\lambda}$ в этом случае можно трактовать как кардинальный стимул, соответствующий красителю всего изображения.

Несмотря на то что мы рассуждаем в контексте сверхмалых изменений концентрации красителей, результаты бóльших изменений этой концентрации все же более или менее предсказуемы, однако нестабильность кардинальных стимулов субтрактивных систем препятствует отысканию кардинального стимула, строго согласованного с большими изменениями этой концентрации.

Распределение энергии $E_\lambda a_{2\lambda}$ и $E_\lambda a_{3\lambda}$, безусловно, определяет кардинальные стимулы P_2 и P_3, управляемые красителями со спектральными плотностями соответственно $a_{2\lambda}$ и $a_{3\lambda}$. Три кардинальных стимула (P_1, P_2 и P_3) в дальнейшем могут использоваться в разных целях, в частности при определении теоретических кривых чувствительности фотоматериала при данном наборе красителей, а также при определении траектории движения позиций стимулов в треугольнике цветностей по мере изменения концентраций красителей и их удаления от серого. При необходимости воспроизведения особо хроматичных элементов можно подобрать иные наборы кардинальных стимулов, пользуясь выражениями $T_\lambda E_\lambda a_{1\lambda}$, $T_\lambda E_\lambda a_{2\lambda}$ и $T_\lambda E_\lambda a_{3\lambda}$.

9.7 ДИХРОМАТИЧЕСКИЕ СУБТРАКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

Если все цветовые стимулы сцены будут уравнены смесью только двух стимулов, полученных, соответственно, только от двух красок, то будет реализовано колориметрически корректное дихроматическое субтрактивное цветовоспроизведение. Стимулы большинства сцен, однако, выходят далеко за рамки данного ограничения, но тем не менее дихроматическое цветовоспроизведение (обычно используются голубой и оранжевый красители) порой оказывается на удивление работоспособным, благодаря чему в свое время оно активно использовалось в кинематографе (Cornwell-Clyne, 1959, p. 343; Lobban, 1988).

Рис. 22.6 демонстрирует достижимый уровень цветопередачи при дихроматическом цветовоспроизведении: в правом верхнем углу показан результат, полученный с помощью дихроматической телевизионной системы (оранжевый и голубой кардинальный стимулы), который сравнивается с результатом обычного трихроматического цветовоспроизведения (правый нижний угол).

Результат дихроматического цветовоспроизведения весьма зависим от контекста: сцены в интерьерах помещений обычно передаются весьма реалистично (вероятнее

всего, потому, что в освещении от свеч и желтоватых ламп накаливания очень мало «синего» содержимого, то есть низкий уровень коротковолнового сигнала сводит зрительный процесс практически к двум переменным); уличные сцены, как правило, получаются плохо, а основным недостатком дихроматических систем является почти полная неспособность передавать градации цветового тона неба и листвы.

9.8 КАЧЕСТВО СУБТРАКТИВНОГО ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Желающих детально изучить вопросы высокоточного субтрактивного цветовоспроизведения, в частности влияние на него изменений в спектральной чувствительности, контрасте и характеристиках красителей, адресуем к главам 13 и 14 работы Evans, Hanson и Brewer (1953). Здесь же достаточно указать на то, что у цветовоспроизведения, основанного на субтрактивном способе получения кардинальных стимулов, существуют фундаментальные ограничения:

— отдельные стимулы некоторых сцен могут обладать слишком высокой колориметрической чистотой, чтобы быть репродуцированными при помощи доступных красителей;

— в пленочной фотографии все стимулы сцен (неважно, воспроизводимы они или нет) можно репродуцировать с определенными искажениями из-за отсутствия адекватных отрицательных участков в кривых чувствительности всех эмульсионных слоев;

— кривые почернения, то есть кривые оптической плотности, как функции от логарифма экспозиции эмульсионных слоев, обычно не строго линейны и, следовательно, могут давать погрешности;

— наконец, фактические красители поглощают свет там, где должны иметь 100% пропускания.

С другой стороны:

— принудительное обострение и сдвиг пиков спектральной чувствительности могут компенсировать неадекватность отрицательных участков в кривых чувствительности;

— межслойные эффекты и маскирование могут ощутимо ослабить влияние паразитного поглощения;

— реальные красители могут воспроизвести чуть большее количество цветовых стимулов, чем красители идеальные;

— как было показано в гл. 5, визуальные допуски на точность воспроизведения достаточно велики.

В итоге практический результат может оказаться (и часто оказывается) исключительно удачным.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

B.R.E.M.A. P.A.L. Working Party, Radio Electron. Eng., 38, 201 (1969).

Clapper, F.R., Gendron, R.G., and Brownstein, S.A., J. Opt. Soc. Amer., 63, 625 (1973).

Clarkson, M.E., and Vickerstaff, T., Phot. J., 88b, 26 (1948).

Cornwell-Clyne, A., Colour Cinematography, p. 343, Chapman & Hall, London (1951).

Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, Wiley, New York (1953).

Hanson, W.T., and Brewer, W.L., J. Opt. Soc. Amer., 45, 476 (1955).

Lobban, G, Image Technology, 70, 70 (1988).

MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 28, 399 (1938).

MacAdam, D.L., J. Phot. Sci., 14, 229 (1966). See Figs. 34 and 35.
Ohta, N., Phot. Sci. Eng., 15, 399 (1971a).
Ohta, N., Phot. Sci. Eng., 15, 416 (1971b).
Ohta, N., Phot. Sci. Eng., 15, 487 (1971c).
Ohta, N., Applied Optics, 10, 2183 (1971d).
Ohta, N., J. Opt. Soc. Amer., 62, 129 (1972a).
Ohta, N., J. Opt. Soc. Amer., 62, 185 (1972b).
Ohta, N., J. Imaging Sci., 35, 94 (1991).
Pearson, M.L., Pobboravsky, I., and Yule, J.A.C., Proc. Tech. Assoc. Graphic Arts, 20, 330 (1968).
Pearson, M.L., and Yule, J.A.C., J. Color and Appearance, 2, 30 (1973).
Umberger, J.Q., Phot. Sci. Eng., 7, 34 (1963).
Yule, J.A.C., Pearson, M.L., and Pobboravsky, I., Printing Technology, 12, 150 (1968).
Yule, J.A.C., Private Communication (1971).
Yule, J.A.C., Principles of Color Reproduction, p. 138, Wiley, New York (1967).

10 ИСТОЧНИКИ СВЕТА

10.1 ВВЕДЕНИЕ

Мы уже говорили о том, что зрительная система человека способна адаптироваться к свету разного спектрального состава. К примеру, при свете ламп накаливания, в которых весьма мало коротковолнового («синего») компонента, зрение повышает свою «синюю» чувствительность. Набор источников света, которые могут сильно исказить цветопередачу, в целом невелик.

В разделе 5.7 было показано, что камеры (пленки, принтеры и т.п.) должны «адаптироваться» к источнику света аналогичным образом, поскольку степень адаптации зрительной системы наблюдателя по самоей оригинальной сцене намного больше, чем по изображению этой сцены (при том же освещении).

В деле цветовоспроизведения учет вариаций спектрального распределения энергии источников света настолько важен, что мы посвящаем ему отдельную главу.

10.2 ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

10.2.1 Вольфрамовые лампы накаливания

Наиболее важными и наиболее распространенными искусственными источниками света являются вольфрамовые лампы накаливания. Спектральное распределение энергии их света в определенной степени зависит от спектрального коэффициента пропускания стеклянной колбы, хотя в целом последняя бесцветна (обычно лишь слегка зеленовата), и, следовательно, ее влияние невелико.

Принято считать, что наиболее важным фактором, определяющим спектральное распределение энергии света лампы накаливания, является температура нагрева вольфрамовой нити. Температура эта зависит как от электрического сопротивления нити, так и от напряжения, приложенного к лампе. Изменение цветности света по мере роста накала нити (от комнатной температуры и выше) показано в табл. 10.1: температуры даны в градусах Цельсия (°C) и в градусах Кельвина (K)[1], поскольку последние весьма широко используются при характеризации источников света. Отметим, что значения температур согласованы с названиями цветов лишь приблизительно и что температура, при которой свет начинает восприниматься белым, зависит от статуса адаптации наблюдателя, а также от интенсивности этого света (Hurvich и Jameson, 1951).

Максимально достижимая температура нити ламп накаливания ограничена точкой плавления вольфрама (около 3700 K). Заметим, что современные лампы накаливания, работающие примерно при 3000 K, испускают свет, который большинство людей назовут белым, только когда полностью адаптируются к нему.

Спектральное распределение энергии света вольфрамового источника определить очень просто, и недаром его называют «*полным излучателем*», «*планковским излучателем*» или «*абсолютно черным телом*». Абсолютно черное тело в идеале представля-

---

1 Отличаются от значений Цельсия на 273.

ТАБЛИЦА 10.1 Температуры раскаленных предметов (накальные источники)

Оттенок	Температура °С	Температура К
Предельно глубокий темно-красный	480	753
Глубокий темно-красный	630	903
Темно-красный	750	1023
Вишнево-красный	815	1088
Светлый вишнево-красный	900	1173
Оранжево-красный	990	1263
Желтый	1150	1423
Желтовато-белый	1330	1603

ет собой нагретую непрозрачную сферическую капсулу с небольшим отверстием, испускающим свет. Площадь этого отверстия должна быть намного меньше (к примеру, одна сотая) общей площади внутренней поверхности капсулы (подобно дверце у печки).

Спектральное распределение энергии света планковских излучателей описывается *планковским законом излучения*:

$$P(\lambda)=\frac{c_1}{\lambda^5}\cdot\frac{1}{e^{c_2/\lambda T}-1},$$

где $P(\lambda)$ — это энергия (в ваттах) на квадратный сантиметр поверхности на ширину спектральной полосы в микрометрах (мкм) по данной длине волны; λ — длина волны в мкм; T — температура в кельвинах; $c_1 = 37418$; $c_2 = 14388$; $e = 2.718$.

Когда длина волны достаточно мала, а температура не очень высока, $e^{c_2/\lambda T}$ стремится к единице и $P(\lambda)$ аппроксимируется выражением:

$$P(\lambda)=\frac{c_1}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}},$$

которое известно как *закон излучения Вина*. В отношении температур, типичных для ламп накаливания и волн видимой части спектра, этот закон «работает» с точностью до 1%.

Очевидно, что вольфрамовые лампы накаливания не являются планковскими излучателями в буквальном смысле, поскольку не представляют собой нагретых капсул с отверстиями. Однако относительные спектральные распределения световых энергий таких ламп очень близки к относительным спектральным распределениям энергий планковских излучателей, но с температурами примерно на 50 градусов выше, чем у вольфрамовой нити (в связи с чем цветность ламп накаливания указывают через эти температуры, именуемые *цветовыми температурами*). Таким образом, к примеру, лампы с цветовой температурой 3000 К испускают свет, относительное спектральное распределение энергии которого полностью идентично спектральному распределению энергии планковского излучателя при той же температуре. Фактическая температура

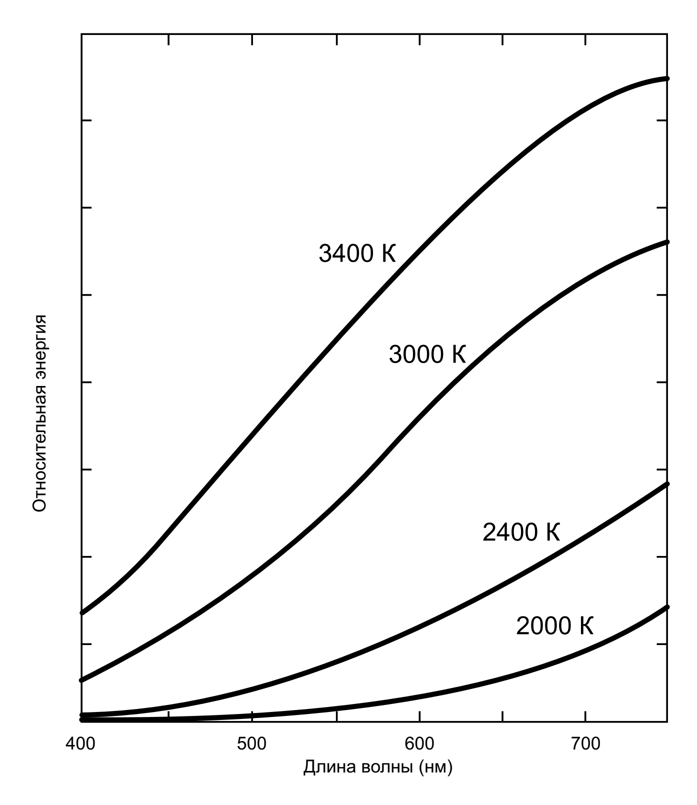


Рис. 10.1 Кривые спектрального распределения энергии планковского излучателя при различных температурах в диапазоне видимых длин волн.

нити при этом будет равна 2950 К, но эта разница столь незначительна, что обычно не принимается во внимание.

На рис. 10.1 показано спектральное распределение энергии планковского излучателя при четырех цветовых температурах (Murray, 1952). По рисунку видно, что чем выше цветовая температура, тем выше эффективность лампы, поскольку при данной мощности испускается больше света и меньше инфракрасных лучей. Плюс к тому высокие цветовые температуры соответствуют более «холодному» свету, и визуальная разница между светом лампы и дневным светом в этом случае оказывается совсем небольшой. Поэтому вольфрамовые источники изготавливаются так, чтобы работать на максимально возможных цветовых температурах.

У ламп с толстой нитью (около 0.2 мм в диаметре) достижима температура порядка 3400 К, но у ламп с тонкими нитями (примерно 0.02 мм в диаметре) максимальные температуры не превышают 2500 К из-за ломкости нити и ее серьезного ослабления вследствие частичного испарения вольфрама. Толстые нити, конечно, обладают меньшим электрическим сопротивлением, чем нити тонкие, и поэтому могут использоваться только при низком напряжении или в лампах высокой мощности. Таким образом, у ламп, работающих на цветовых температурах порядка 3000 К (и выше), при разумном сроке службы, мощность должна быть не менее 250 Вт (при напряжении в диапазоне 200—250 В). Однако для вольтажа диапазона 12—24 В при данных цветовых температурах достигаемая мощность падает до 30 Вт и ниже. Наоборот: на высоких цветовых температурах при данной мощности могут использоваться лампы низкого вольтажа (и, следовательно, высокой световой эффективности).

По описанным причинам в кино- и телестудиях часто используются лампы, рассчи-

танные не на 200—250 В, а на 100—120 В. В кинопроекторах, где нужен высокоэффективный и компактный источник, часто используются лампы с вольтажом меньшим 100 В: высоковольтные лампы не только менее эффективны, но и сложны в изготовлении, поскольку компактные вольфрамовые нити имеют тенденцию к межвитковому дуговому разряду, быстро приводящему к выходу лампы из строя (Aldington, 1954).

Наконец, отметим, что типичная световая эффективность вольфрамовых ламп составляет примерно 25 лм/Вт при 3200 К и 12 лм/Вт при 2650 К.

Износ и перегорание ламп накаливания в основном обусловлены испарением вольфрама с поверхности нити: по разным причинам интенсивность этого процесса на некоторых участках нити выше, чем на других, из-за чего у нее появляются «талии», то есть зоны истончения. Поскольку уменьшение диаметра ведет к повышению электрического сопротивления, «талии» нагреваются сильнее, и вольфрам на этих участках испаряется активнее (что в конечном счете приводит к разрыву нити, то есть, к перегоранию лампы). Плюс к тому испаряющийся вольфрам оседает на внутренней поверхности колбы, образуя серый или коричневатый налет, поглощающий свет и снижающий светоотдачу.

10.2.2 Галогенные лампы накаливания

В *галогенных лампах накаливания* (Zubler и Mosby, 1959; Strange и Stewart, 1963), с целью избежать потемнения, вызываемого испарением вольфрама, нить помещают в колбу, заполненную разреженными парами йода (или другого галогена), а самою колбу изготавливают из кварцевого стекла, выдерживающего температуры более 250°С (Levin и Westlund, 1966). При такой конструкции испарившийся вольфрам реагирует на внутренней поверхности стенок с йодом, образуя при этом газообразный йодид вольфрама:

$$W + I_2 \rightarrow WI_2,$$

в результате чего затемнения колбы не происходит. Йодид вольфрама затем возвращается к поверхности нити, где под воздействием температур свыше 2000°С распадается на вольфрам и йод:

$$WI_2 \rightarrow W + I_2$$

Восстановленный вольфрам оседает на поверхности нити, но, к сожалению, не попадает на наиболее горячие (и, следовательно, наиболее тонкие) ее участки, и галогенные лампы все равно рано или поздно перегорают. Однако за счет йодного цикла и высокого давления газа, препятствующего испарению вольфрама, средний срок службы таких ламп больше, чем срок службы обычных ламп накаливания, и наоборот: при том же сроке службы, что и у обычных ламп, галогенные лампы могут работать при бóльших цветовых температурах.

Колбы галогенных ламп, выдерживающие высокие температуры, необходимые для реализации йодного цикла, должны быть очень компактными. Компактность же галогенных ламп позволяет, в свою очередь, использовать высокоэффективные светоконцентрирующие оптические элементы.

Таким образом, преимущества галогенных ламп накаливания следующие:

— они не темнеют и, следовательно, более эффективны по светоотдаче и более стабильны по сроку службы;

— могут работать на высоких цветовых температурах и, следовательно, обладают большей световой эффективностью;

— компактны, что весьма удобно при использовании в цветорепродукционной системе различных оптических элементов.

Заметим, однако, что пары йода слегка поглощают свет в желто-зеленой части спектра, поэтому, если в колбе слишком высока концентрация паров йода, свет лампы приобретает легкий пурпурный оттенок (Struder и Van Beers, 1964).

Цветные фотопленки, сбалансированные по свету ламп накаливания, обычно требуют строго определенной цветовой температуры освещения сцены (см. раздел 5.7). Когда цветовая температура ламп несколько отклоняется от необходимого значения, то требуемой цветовой температуры экспонирующего света можно добиться с помощью фильтров. Когда же цветовая температура ламп, освещающих сцену, не соответствует цветовому балансу пленки, но при этом одинакова у всех задействованных осветителей, весьма удобным методом коррекции является установка соответствующего фильтра перед объективом камеры. В случаях, когда лампы сильно разнятся по цветовой температуре, то перед каждой из них устанавливают индивидуально подобранный фильтр; при этом перед объективом камеры иногда устанавливается фильтр общей коррекции.

Отметим, наконец, что цветовую температуру ламп накаливания легко измерить с помощью фотоэлектрического колорметра, который сравнивает интенсивность освещения за красным и синим фильтрами, калиброванными по шкале Кельвина (Harding, 1952; Palmer, 1965).[1]

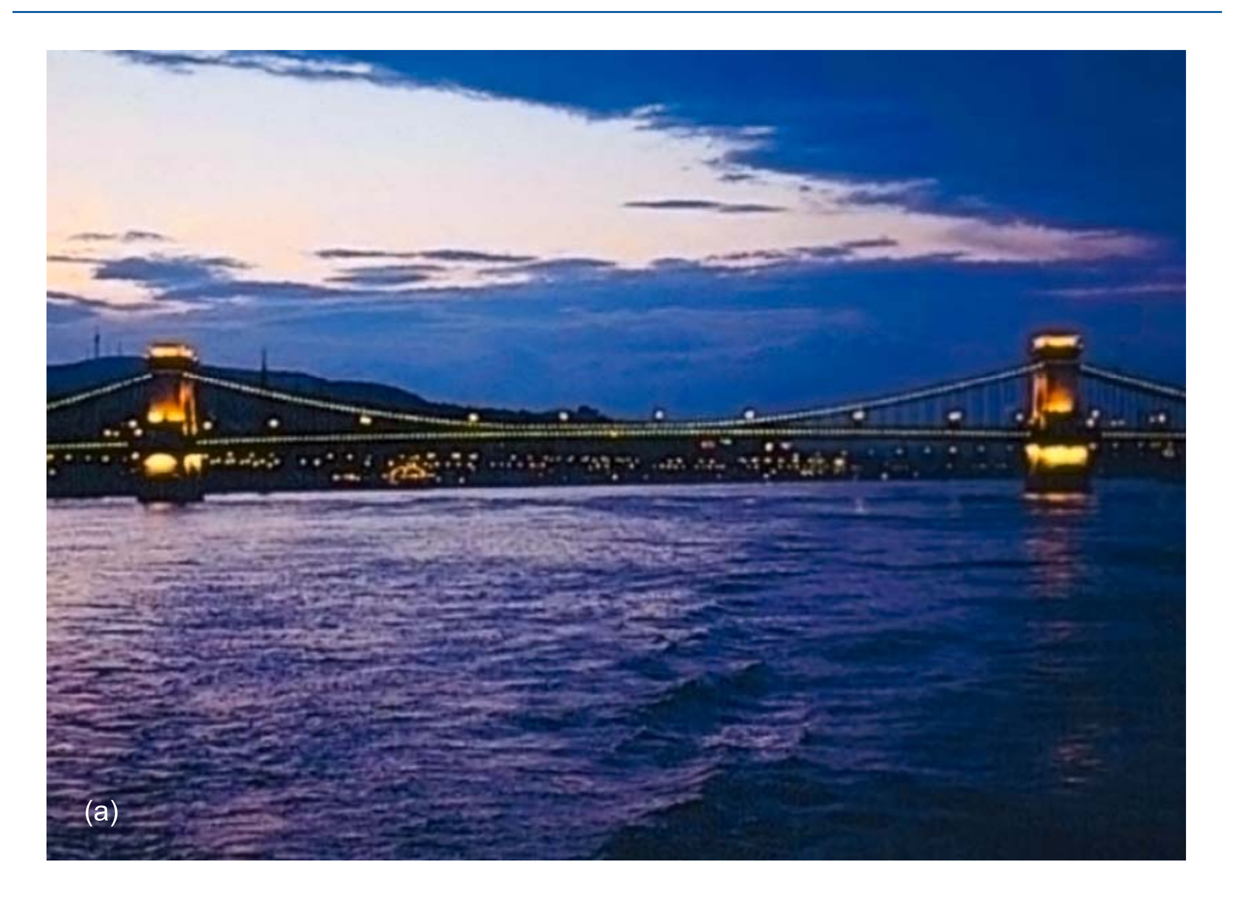
10.3 СПЕКТРО-КОНВЕРСИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ

Если при необходимости изменить цветовую температуру света источников применяются т.н. *спектро-конверсионные фильтры*, то практичнее пользоваться величиной, обратной цветовой температуре, нежели самоей цветовой температурой. Для удобства величина, обратная цветовой температуре, умножается на миллион. Полученное значение именуется *«майред»* (от **mi**cro-**re**ciprocal **d**egrees — *mired*) или *«майрек»* (**mi**cro-**re**ciprocal **k**elvins — *mirek*). То есть цветовая температура в 2000 К эквивалентна 500 майред; 4000 К — 250 майред, а фильтр, конвертирующий спектр планковского излучателя с цветовой температурой 2000 К в спектр с температурой 4000 К, дает изменение в −250 майред. Фильтр такого типа можно изготовить так, что всегда, независимо от того, какова исходная цветовая температура абсолютно черного тела, он будет давать сдвиг в −250 майред с точностью, определяемой законом Вина. Ниже мы приведем доказательство этого важнейшего свойства спектро-конверсионных фильтров.

Допустив, что температуры источников и длины волн спектра таковы, что в отношении них успешно срабатывает закон Вина, получим:

$$P(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}}$$

[1] Фотографические фотоэлектрические колорметры не следует путать с фотоэлектрическими колор*и*метрами — приборами более высокого класса, позволяющими измерять колориметрические координаты света, из которых в дальнейшем можно легко вычислить коррелированную цветовую температуру его источника. — *Прим. пер.*


(a)


(b)







Рис. 10.2 (a) — дневной свет выступает в роли основного освещения, а свет газоразрядных ламп на цепях моста и ламп накаливания на его опорах — в качестве вспомогательного; (b) — в сравнении с дневным, свет ламп накаливания — интенсивно-желтый; (c) — дневной свет весьма вариабелен и зависит от смеси солнечного света, света неба и облаков; (d) — свет низкого солнца желтее, чем свет высокостоящего; (e) на закате свет солнца становится интенсивно-оранжевым.

Зрительная система человека адаптируется к превалирующему освещению, поэтому бо́льшая часть визуальных отличий адаптирующего освещения от дневного света компенсируется. Однако визуальная компенсация хроматического дисбаланса изображений обычно невелика, поскольку они обычно занимают лишь малую часть поля зрения (см. рис. 5.9). Таким образом, компенсация сдвигов в цветности освещения сцены — это задача, решаемая на стадии визуализации: в фотографии компенсацию выполняют либо при печати негативов, либо с помощью фильтров во время съемки, устанавливаемых на объектив камеры, либо же путем подбора подходящего типа слайд-пленки (см. раздел 5.7); при съемке цифровыми фотокамерами регулируют относительную мощность сигнала по красному, зеленому и синему каналам (см. раздел 31.9). Вместе с тем, коль скоро зрение к освещению сцен адаптируется неполностью, для удержания общего колорита их изображения предпочтительна лишь частичная цветокомпенсация.

Прологарифмируем это уравнение по основанию e для температур T и T':

$$\log_e P(\lambda) = \log_e c_1 - 5\log_e \lambda - \frac{c_2}{\lambda T}$$

$$\log_e P'(\lambda) = \log_e c_1 - 5\log_e \lambda - \frac{c_2}{\lambda T'}$$

Следовательно:

$$\log_e P(\lambda) - \log_e P'(\lambda) = \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}\right)\frac{c_2}{\lambda}$$

Выражение $\log_e P(\lambda) - \log_e P'(\lambda)$ — это разница (в логарифмических единицах) между двумя спектральными распределениями, позиционирующая оптическую плотность (по основанию e), которую должен иметь фильтр по каждой из длин волн для конверсии спектрального распределения энергии, характеризуемого цветовой температурой «T», в распределение, характеризуемое цветовой температурой «T'». Из вышеприведенного уравнения следует, что оптическая плотность такого фильтра по каждой из длин волн (т.н. *монохроматическая* или *спектральная оптическая плотность*) будет обратно пропорциональна длине волны и прямо пропорциональна выражению:

$$\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}$$

(Данное выражение — это одна миллионная майред-сдвига.) Таким образом, характер фильтра определяется только этим сдвигом, но не цветовыми температурами T или T'.

Логарифмический вариант (по e-основанию) кривой спектральной оптической плотности (D_e), которая должна быть у фильтра при заданном майред-сдвиге (M), вычисляется по формуле:

$$D_e = \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T}\right)\frac{c_2}{\lambda} = 10^{-6}\,\frac{Mc_2}{\lambda}$$

Однако оптическая плотность обычно оценивается по основанию 10, поэтому:

$$D = 10^{-6}\,\frac{Mc_2}{2.303\lambda}$$

Коль скоро $c_2 = 14388$, получаем:

$$D = 0.00624M\,\frac{1}{\lambda}$$

Следовательно, если D отложить по оси ординат, а $1/\lambda$ по оси абсцисс, то получится прямая, наклон которой (m) будет:

$$m = 0.00624M$$

И наоборот, если фильтр имеет наклон m, то майред-сдвиг — это:

$$M = (160.2)m$$

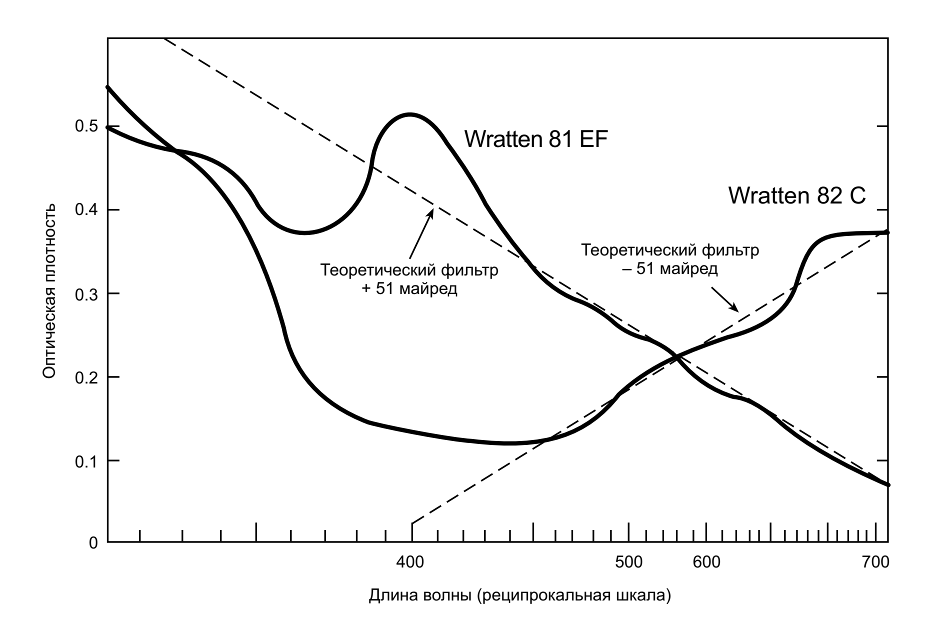


Рис. 10.3 Кривые спектральной оптической плотности теоретических (пунктирные линии) и фактических (сплошные линии) спектро-конверсионных фильтров.

Отметим, что прямая будет иметь наклон m тогда, когда единица оптической плотности на оси ординат идентична по величине одной единице обратного микрометра на оси абсцисс.

Следует отметить также, что когда величины M и m — положительны, то при положительном майред-сдвиге (то есть при понижении цветовой температуры) спектральная оптическая плотность фильтра растет обратно пропорционально длине волны, а падает, следовательно, — прямо пропорционально ей. Наоборот: при отрицательном майред-сдвиге, то есть при росте цветовой температуры, спектральная оптическая плотность фильтра растет прямо пропорционально длине волны.

На рис. 10.3 показаны спектральные оптические плотности двух wratten-фильтров (81 EF и 82 C): на ось абсцисс нанесена т.н. *реципрокальная* (обратная) *шкала* длин волн, а по оси ординат отложены величины спектральной оптической плотности. Если некие фильтры являются истинными спектро-конверсионными фильтрами, то кривые их спектральных оптических плотностей будут прямыми линиями, и мы видим, что на большей части видимого спектра ($\Delta\lambda$ на рис. 10.3) кривые фактических фильтров очень близки к теоретическим кривым (пунктирные линии). На первый взгляд, отличия фактических кривых от идеальных по коротким волнам весьма велики, но реципрокальная шкала в этой области спектра сильно растянута, поэтому данные дефекты выглядят несколько преувеличенно; плюс к тому, световая энергия вольфрамовых ламп накаливания в этой области спектра весьма мала. Таким образом, на практике как данные два фильтра, так и подобные им стеклянные и желатиновые фильтры различных майред-сдвигов с большим успехом используются в качестве спектро-конверсионных.

10.4 ДНЕВНОЙ СВЕТ

Наиболее частый, но при этом и наиболее вариабельный источник освещения сцен — дневной свет. Солнце, которое определяет все фазы дневного света, в центре своем, судя по всему, нагрето до миллионов градусов, но на поверхности оно намно-

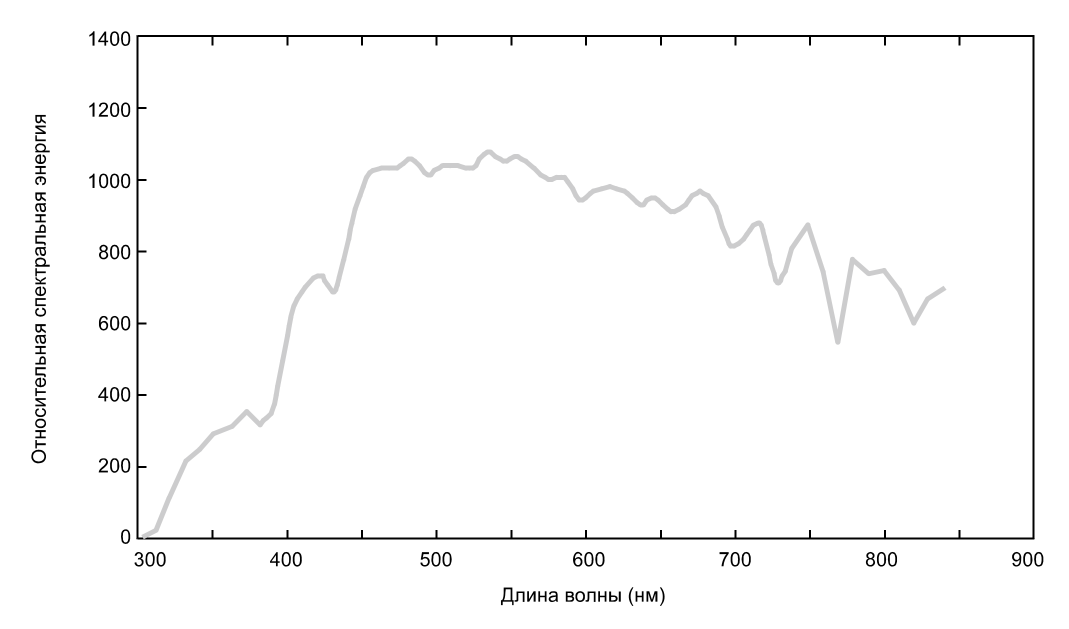


Рис. 10.4 Типичная кривая спектрального распределения энергии солнечного света, зафиксированная у поверхности Земли (McAdam, 1958).

го холоднее, и цветовая температура испускаемого им света лежит примерно между 6000 и 7000 К. Точное значение определить сложно, поскольку свет проходит через солнечную и земную атмосферы, которые не только не нейтральны, но и не постоянны в своих спектральных поглощениях (Moon, 1940; Taylor и Kerr, 1941; Jones и Condit, 1948; Hull, 1954).

На рис. 10.4 показано типичное спектральное распределение энергии солнечного света, зафиксированное у земной поверхности (McAdam, 1958): кривая демонстрирует множество максимумов, часть из которых вызвана полосами поглощения в солнечной атмосфере (т.н. *фраунгоферовы линии*), остальные — поглощением в атмосфере Земли (в частности, за счет кислорода и паров воды).

Если небо ясно и безоблачно, то общий дневной свет содержит смесь прямого солнечного света с диффузным светом, рассеянным земной атмосферой. Поскольку свет коротких волн рассеивается больше, чем свет длинных, в свете неба преобладает синий компонент (синевы тем больше, чем яснее небо). Свет неба, однако, рассеивается не только в направлении Земли, но также и в космос, поэтому при смешении солнечного света со светом неба имеют место определенные потери коротковолнового компонента.

Спектральное распределение энергии света, испускаемого солнечной поверхностью, весьма близко к спектральному распределению энергии планковского абсолютно черного тела, но, как мы видим, у земной поверхности солнечный свет ощутимо отклоняется от этого распределения за счет рассеивания коротковолнового («синего») компонента и за счет поглощения излучения солнечной и земной атмосферами.

На рис. 10.5 показаны спектральные распределения энергии типичного дневного света при ярком солнце (кривая «A») и при облачном небе (кривая «B») (Henderson и Hodgkiss, 1963 и 1964). Для сравнения дано спектральное распределение света планковского излучателя при 5630 К (кривая «C»): мы видим, что при общем подобии спек-

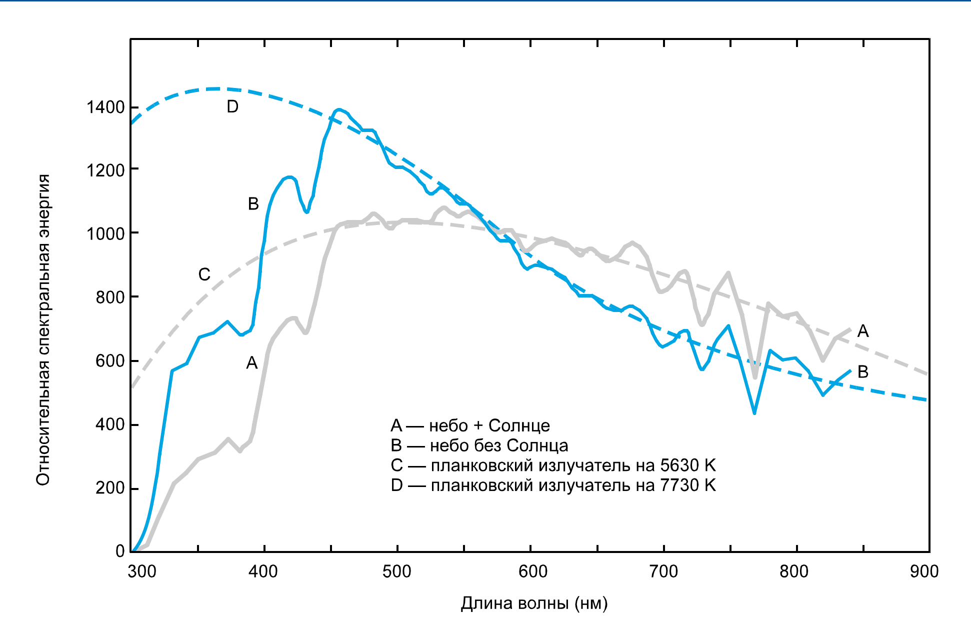


Рис. 10.5 Типичные кривые относительного спектрального распределения световой энергии при ярком солнце (A) и в облачную погоду (B) (Henderson и Hodgkiss, 1963 и 1964) вместе с ближайшими к ним кривыми спектрального распределения энергии планковских излучателей.

тральных распределений дневного света и света планковского тела имеются и весьма ощутимые различия.

Разница между цветовой температурой солнечного света у земной поверхности (в данной фазе) и температурой на поверхности Солнца (6000—7000 К) — это мера потери коротковолнового света за счет его рассеяния в космосе: в сравнении со светом планковского излучателя у дневного света явно не хватает энергии на длинах волн, меньших 430 нм.

Для сравнения спектрального распределения энергии дневного света в облачную погоду со спектральным распределением энергии света планковского излучателя при 7730 К на рис. 10.5 дана пунктирная кривая «D».

В облачную погоду спектральное распределение дневного света зависит от высоты облаков: если облака расположены низко, то они выступают в роли нейтрального рассеивающего и поглощающего слоя, который смешивает синий свет неба с прямым солнечным светом, порождая тем самым рассеянный свет, цветность которого подобна цветности смеси прямого солнечного света и света неба в ясный день; однако если верхняя поверхность облаков находится очень высоко, то спектральное распределение энергии света у поверхности Земли будет похожим на солнечный свет вне земной атмосферы. Это объясняется тем, что самый верхний слой облаков захватывает бóльшую часть рассеянного синего света *прежде,* чем тот пропадет в космосе, и перенаправляет его на Землю. На рассеяние большей части синего света неба на меньших высотах указывает то, что на высоте порядка 12000 метров небо выглядит весьма темным (Harding и Lambert, 1951). Наконец, отметим, что цветовая температура, при которой спектральное распределение энергии дневного света соответствует средней облачности, примерно равна 6500 К (что в целом равно цветовой температуре солнечного света за пределами земной атмосферы).

Далее. На рис. 10.6 даны спектральные распределения энергии дневного света при разных погодных условиях (Condit и Grum, 1964).

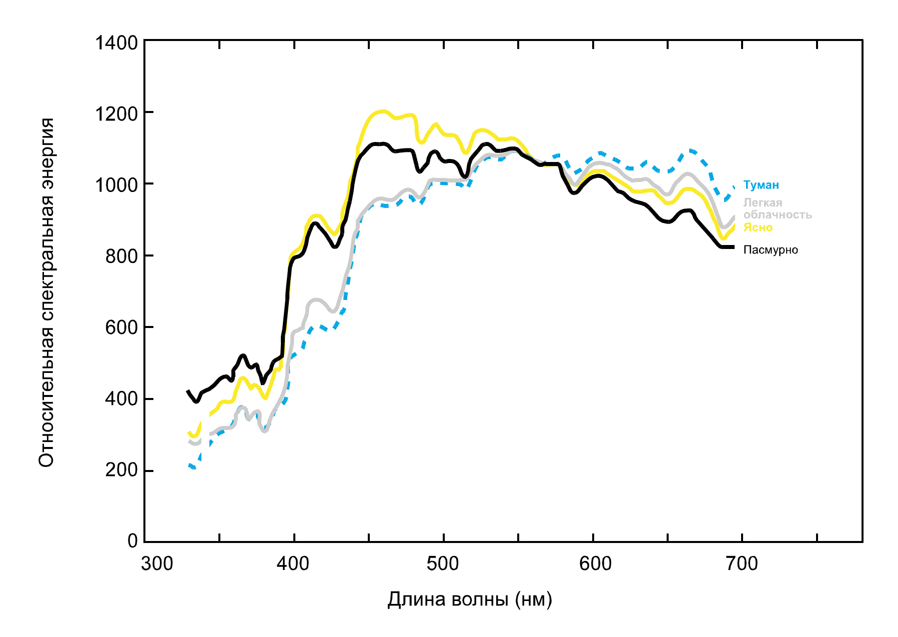


Рис. 10.6 Кривые относительного спектрального распределения энергии дневного света в типичных погодных условиях (ясно, легкая облачность, пасмурно, туман), зафиксированные в вертикальном положении плоскости сенсора, направленного в сторону Солнца (Condit и Grum, 1964).

Действительно, цветность дневного света, как света солнечного, зависит от погодных условий:

— если небо ясно, то повышение толщины атмосферного слоя, через который проходят солнечные лучи прежде чем упасть на поверхность Земли, ведет к очевидному покраснению света, что демонстрирует кривая спектрального распределения энергии на рис. 10.7 (Condit и Grum, 1964). Таким образом, изображения, полученные при свете Солнца, стоящего низко над горизонтом, могут иметь резко выраженный оранжевый сдвиг хроматического баланса. Вместе с тем на закате прямые солнечные лучи постепенно слабеют, и поэтому рассеянный свет, который, напомним, очень синий, начинает играть все бóльшую и бóльшую роль[1]. Поэтому на закате свет вначале краснеет, а затем синеет;

— при облаках средней высоты перед закатом происходит покраснение света, но вскорости начинает быстро нарастать синева;

— при высоких облаках свет перед закатом либо краснеет очень мало, либо не краснеет совсем.

Питт и Сельвин обнаружили, цветность света на закате более или менее стабильна до тех пор, пока не начнет нарастать синева (Pitt и Selwyn, 1938).

Общая изменчивость цветности дневного света в течение дня, определяемая его различными фазами, весьма ясно выражена, что хорошо видно по рис. 10.8, где даны спектральные распределения энергии в двух вариантах измерения: плоскость фотоприемника, направлена прямо на Солнце — с угловой высотой 8° и в сторону от Солнца — с угловой высотой 30° (Condit и Grum, 1964).

---

[1] См., к примеру, рис. 18 статьи Джонса и Кондит (Jones и Condit, 1948), где интенсивности солнечного света и света неба, а также их соотношение, даны как функция от угловой высоты Солнца.

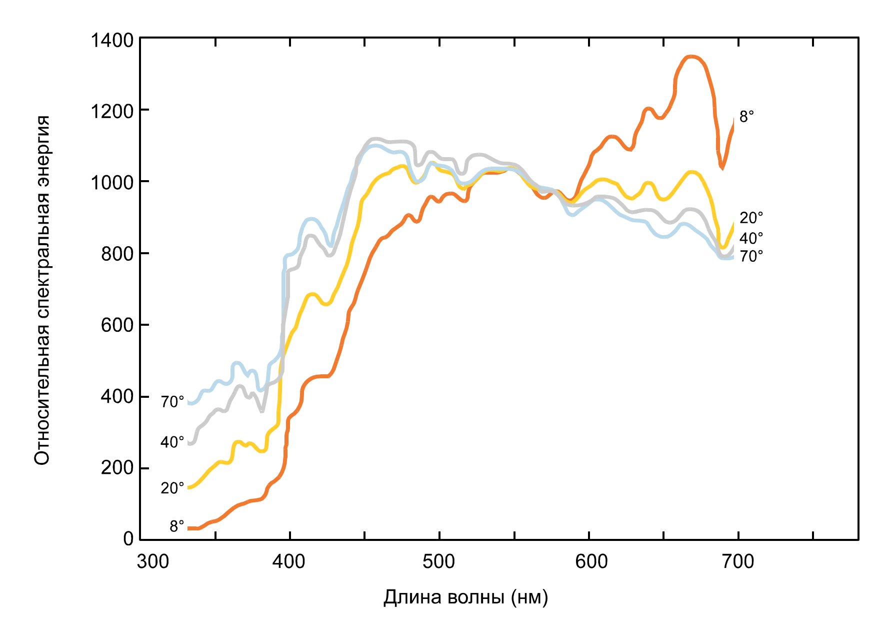


Рис. 10.7 Кривые относительного спектрального распределения энергии дневного света в ясную погоду при разных угловых высотах Солнца, зафиксированные при вертикальном положении плоскости сенсора, направленного в сторону Солнца (Condit и Grum, 1964).

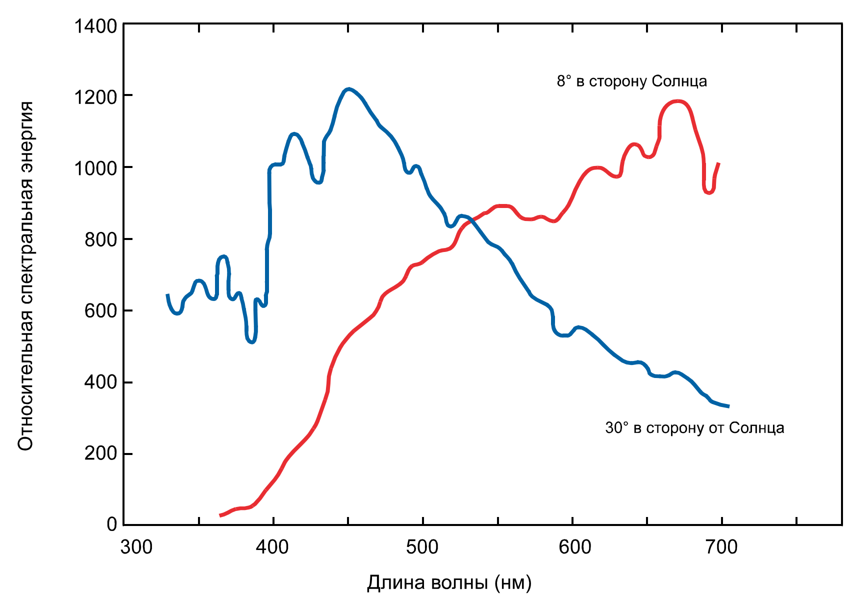


Рис. 10.8 Кривые относительного спектрального распределения энергии дневного света в предельно синей (плоскость сенсора на 30° в сторону от Солнца) и предельно красной (плоскость сенсора на 8° в сторону Солнца) фазах дневного света.

В таблице 10.2 дан список кодаковских цветокомпенсационных фильтров, используемых при коррекции оттенков дневного света различных фаз. Однако, коль скоро предметом наших рассуждений является цветовоспроизведение, данные в таблице лишь приблизительны по сравнению с теми, которые фактически будут получены на солнечном свету в ясный день при угловой высоте Солнца в 55°. Следует особо подчеркнуть, что рекомендации по каждому фильтру изначально неточны и что обстоятельст-

ТАБЛИЦА 10.2 Фотографические цветокомпенсационные фильтры Kodak, применяемые с целью коррекции оттенков дневного света различных фаз дня.
«B» — Солнце позади камеры; «C» — Солнце перед камерой.

Погода	Солнечная	Солнечная	Облачная	Облачная
Позиция Солнца	B	C	B	C
Угловая высота Солнца				
10—15°	20B + 5C	Нет	10B + 5C	5B + 5C
15—20°	10B	—	10B	5C
20—30°	5B	5Y	5B	Нет
30—40°	Нет	10Y	Нет	—
40—50°	—	10Y	—	—
50—60°	—	15Y	—	5Y

ва, при которых требуется тот или иной фильтр, весьма изменчивы и зависят от преобладающих погодных условий.

Для оценки относительного сине-красного баланса дневного света можно использовать уже упоминавшиеся фотоэлектрические колорметры, проградуированные в показателях соответствующего диапазона коррекционных фильтров (поскольку данные будут совершено непохожи на данные, получаемые при свете планковского излучателя).

Стоит отметить, что, с художественной точки зрения, формальная коррекция подцветки освещения не всегда желательна, поскольку для создания нужного «настроения», к примеру легкой синевы в пасмурную погоду или желтизны при низком солнце (см. рис. 10.2), некоторое цветоискажение репродукции может оказаться весьма кстати.

В свое время международная комиссия по освещению (CIE) стандартизировала для промышленного применения спектральные распределения энергии дневного света в диапазоне его *коррелированных цветовых температур* (данное понятие определено в разделе 10.11) от 4000 до 25000 К (Judd, McAdam и Wyszecki, 1964). Эти распределения относятся к категории стандартных D-осветителей (некоторые из которых даны в таблице Приложения 2, а локус $u'v'$-цветностей D-осветителей показан на рис. 10.14 и 10.15).

10.5 ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

Спектральное распределение энергии люминесцентных (флуоресцентных) ламп представляет собой сумму спектра паров ртути и спектров излучения различных порошковых люминофоров (Randy, 1968). Типичные примеры даны на рис. 10.9 (острые пики спектра вызваны парами ртути; пологие — люминофорами).

Лампа F2 представляет источники «нормального» типа с высокой светоотдачей (порядка 80 лм/Вт); лампа F7 — типичные «широкополосные» источники света с низ-

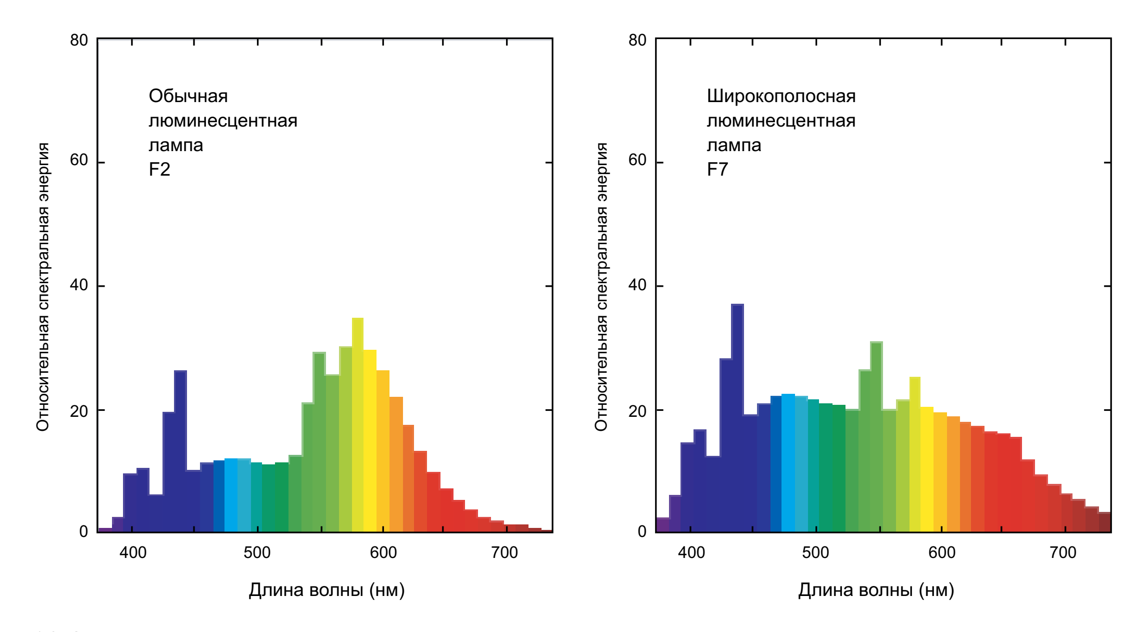


Рис. 10.9 Относительные спектральные распределения энергии люминесцентных ламп F2 и F7. Энергии представлены в виде гистограмм с шагом 10 нм.

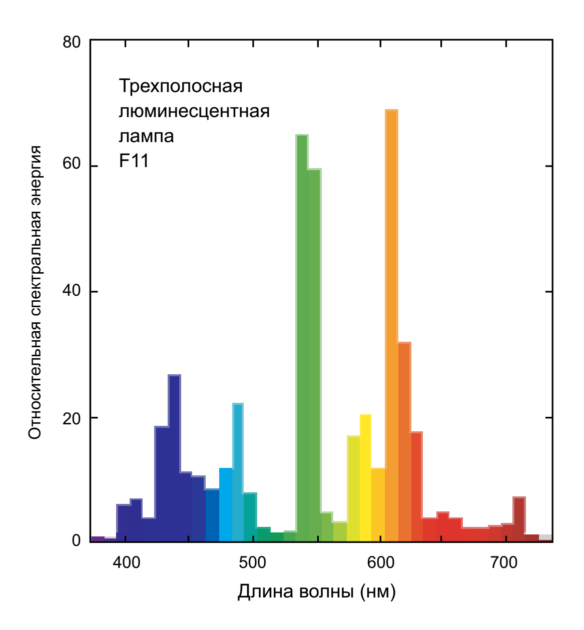


Рис. 10.10 Относительное спектральное распределение энергии трехполосной люминесцентной лампы F11. Энергия представлена в виде гистограммы с шагом 10 нм.

кой светоотдачей (порядка 45 лм/Вт), но с превосходной цветопередачей за счет высокой энергии в красном конце спектра.

Спектральное распределение лампы F11, показанное на рис. 10.10, представляет источники «трехполосного» типа, построенные на люминофорах, отдающих свет преимущественно в виде узких полос с максимумами на длинах волн порядка 435, 545 и 610 нм. Трехполосные источники обладают высокой светоотдачей (порядка 80 лм/Вт), и, поскольку центры полос лежат примерно на тех же длинах волн, на которых находятся пики чувствительности колбочек сетчатки, эти источники также обла-

ТАБЛИЦА 10.3 Спектроконверсионные (Kodak Wratten), цветокомпенсационные (CC) и светобалансирующие фильтры для различных типов цветных фотопленок

Тип осветителя	Фотопленка		
	Для дневного света	Тип «A»	Тип «B»
Дневной свет (см. табл. 10.2)	Нет	85 или 85C	85B
Синие фотовспышки	Нет	85	85B
Фотовспышки с алюминиевой нитью	80C	81C	81C
Фотовспышки с циркониевой нитью	80D	81C	81C
Электронные фотовспышки (ксеноновые)	Нет	85	85B
Лампы накаливания на 3200 K	80A	82A	Нет
Фотографические лампы накаливания на 3400 K	80B	Нет	81A
Люминесцентные лампы (рекомендуется предварительная проверка):			
— дневного света	CC20M	—	85B+ CC20M
— теплого белого света	CC30B	—	CC40R
Электронно-лучевые телевизионные трубки (рекомендуется предварительная проверка)	Нет	85 или 85C	85B

дают вполне приемлемой цветопередачей, хотя и имеют склонность завышать чистоту цвета некоторых объектов (Thornton, 1972), что известно как *эффект визуальной кларификации* (см. раздел 10.13).

Безусловно, спектральные распределения энергии люминесцентных ламп весьма вариабельны, и те, что показаны на рис. 10.9 и 10.10, — это лишь примеры (спектральные распределения их энергии даны в табличной форме в Приложении 2).

Когда люминесцентные лампы используются при освещении сцен, фиксируемых на цветные пленки, ртутная полоса на 546 нм в спектре этих ламп, особенно в сочетании с низким уровнем энергии в красной части спектра (как, скажем, у F2-источников), часто ведет к неприемлемому зеленому сдвигу изображения. В таблице 10.3 дан ряд общих рекомендаций по подбору фильтров, компенсирующих этот сдвиг, но при этом необходимо помнить, что высокая вариабельность сенсибилизации фотопленок, а также разнообразие люминесцентных ламп (и их широкая распространенность) делают невозможным единый подход к решению данной проблемы. Таким образом, для получения приемлемых результатов всегда рекомендуется серия практических тестов.

И последнее: если при съемке в свете люминесцентных ламп используется необыч-

но длинная выдержка, то для компенсации встречных недостатков фотопленки может понадобиться дополнительная цветокоррекция.

10.6 НАТРИЕВЫЕ, РТУТНЫЕ И МЕТАЛЛОГАЛОГЕННЫЕ ЛАМПЫ

Хорошо известно, что газоразрядные лампы, использующие пары натрия или ртути низкого давления, обладают очень плохой цветопередачей и применяются поэтому только для уличного освещения: натриевые лампы испускают свет лишь по двум полосам в районе 589 нм, а ртутные, условно говоря, не испускают длинноволнового («красного») света. По мере повышения давления паров натрия или ртути, спектральные линии расширяются на весь видимый спектр, поэтому натриевые лампы высокого давления имеют коррелированную цветовую температуру порядка 2000 K (но все равно используются в основном только для уличного освещения).

При добавке к парам ртути металлогалогенов в спектре лампы появляются дополнительные линии, и цветопередачу можно улучшить без принудительного расширения спектральных полос и без снижения светоотдачи, как, скажем, в случае люминесцентных ламп (Beeson и Robinson, 1969; Aldworth, 1971). Следовательно, металлогалогенные газоразрядные лампы пригодны для т.н. *заливающего освещения* (к примеру, стадионов), поскольку они компактны и легко устанавливаются в рефлекторах, направляющих свет в нужное место (к тому же, металлогалогенная добавка повышает светоотдачу этих и без того эффективных источников).

Металлогалогенные лампы с коррелированной цветовой температурой от 3000 до 6000 K, светоотдача которых может достигать 100 лм/Вт, также находят специфическое применение, однако спектральное распределение энергии таких ламп (к примеру, показанное на рис. 10.11) весьма отлично от спектрального распределения света планковского излучателя. Такие лампы иногда используются в цветном телевидении (спортивные передачи), а также в качестве заполняющего дневного света при теле- и киносъемках (Aldworth и Beeson, 1971; Davies, Jackson и Rogers, 1972; Aldworth, 1975).

Наконец, отметим, что свет металлогалогенных ламп может менять цветность как по мере их нагрева, так и по мере их старения (Kaufman и Sauter, 1974); плюс к тому отметим, что при изготовлении металлогалогенных ламп для предотвращения их мерцания должны приниматься специальные меры (Samuelson, 1977).

10.7 КСЕНОНОВЫЕ ДУГОВЫЕ ЛАМПЫ

Еще одним источником света, дающим смесь излучения непрерывного спектра с монохроматическим излучением, являются ксеноновые дуговые лампы (Beeson, Bocock, Castellain и Tuck, 1958; Uffers, 1958), типичное спектральное распределение которых показано на рис. 10.12. Точная кривая спектрального распределения энергии этих источников частично зависит от давления ксенона в колбе, но, как правило, оно весьма близко к спектральному распределению энергии дневного света при коррелированной цветовой температуре 6000 K. Однако излучение на красном и синем концах спектра ксеноновых источников несколько выше, в результате чего свет этих ламп (в сравнении с дневным) имеет легкий пурпурный оттенок.

Ксеноновые лампы пригодны как для непрерывного горения, так и для очень коротких энергетических импульсов, дающих световую вспышку порядка 1/1000 с, что

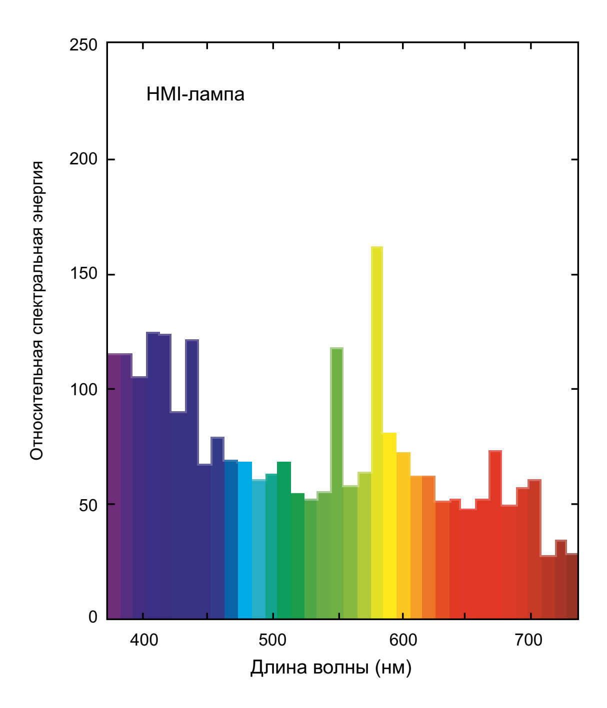


Рис. 10.11 Относительное спектральное распределение HMI-лампы (Hidrargirum-Medium arc-Iodides), в которой к ртутным парам высокого давления добавлены йодиды. Используется в качестве источника заполняющего дневного света при теле- и киносъемках. Спектральная энергия представлена в виде гистограммы с шагом 10 нм.

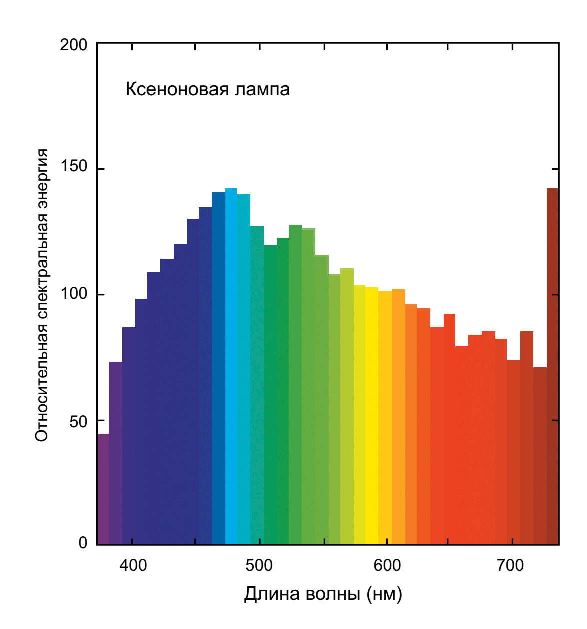


Рис. 10.12 Относительное спектральное распределение ксеноновой лампы. Спектральная энергия представлена в виде гистограммы с шагом 10 нм.

находит применение в фотографии. Лампы непрерывного горения могут использоваться в кинопроекторах, студийном освещении, заливающем освещении, а также при форсированных тестах на выцветание красок, но в основном этот вид источников востребован в ситуациях, когда необходим свет с цветностью близкой к цветности дневного света.

10.8 УГОЛЬНЫЕ ДУГОВЫЕ ИСТОЧНИКИ

Угольные дуговые источники обычно не имеют какой-либо стеклянной колбы, т.е. работают прямо на воздухе. Они используются в основном в профессиональных кинопроекторах. Свет угольных источников частично исходит из сильно нагретых каверн угольных стержней, между которыми образуется плазменная дуга, частично — от самой дуги. Световую эффективность и цветность излучения угольных ламп улучшают за счет цериевых добавок к угольным стержням (Dull и Kemp, 1956). Типичное спектральное распределение света угольной лампы показано на рис. 10.13 (a).

Наконец, отметим, что порой возникает необходимость в дополнительном оснащении студий угольными дуговыми источниками, и в этом случае необходимо, чтобы эти источники испускали свет с коррелированной цветовой температурой порядка 3200 К (для чего к стержням подбираются соответствующие добавки). Типичное спектральное распределение света таких источников показано на рис. 10.13 (b) (Holloway, Plasket, Dull и Handley, 1955; Dull и Kemp, 1956).

10.9 ФОТОВСПЫШКИ

Фотографические лампы-вспышки (фотовспышки), как правило, представляют собой заполненную кислородом стеклянную колбу, в которую заключена воспламеняющаяся металлическая нить, чаще алюминиевая. Когда используется алюминиевая нить, свет фотовспышки обычно подобен свету планковского излучателя при 3800 К, когда циркониевая — при 4000 К. Лампы-вспышки ориентированы на работу с фотопленками, сбалансированными по дневному свету, поэтому колбу вспышек обычно покрывают специальным подсиненным лаком, повышающим эффективную цветовую температуру примерно до 5500 К (Keeling, 1969).

Свет современных электронных фотовспышек определяется количеством ксенона в их колбах (см. раздел 10.7).

10.10 ЭФФЕКТ КРАСНЫХ ГЛАЗ

У персонажей цветных снимков, сделанных при свете вспышки, мы часто видим красные зрачки (вместо ожидаемых черных). Данный эффект возникает из-за того, что свет отражается от тканей, лежащих позади сетчатки: коль скоро эти ткани красные (за счет кровеносных сосудов) — отраженный свет тоже красный. В повседневной жизни эффект красных глаз не возникает, поскольку количество света, отражающегося от внутренних поверхностей глаза, в сравнении с общим уровнем освещения — крайне мало. Однако при съемке со вспышкой, в момент экспозиции, уровень направленного освещения намного выше освещения окружающего, и оптическая система глаза направляет отраженный свет узким пучком назад, к вспышке. Если камера находится в непосредственной близости от этого пучка, то она захватывает его, и зрачки на снимке фиксируются как красные. Полностью устранить данный эффект можно,

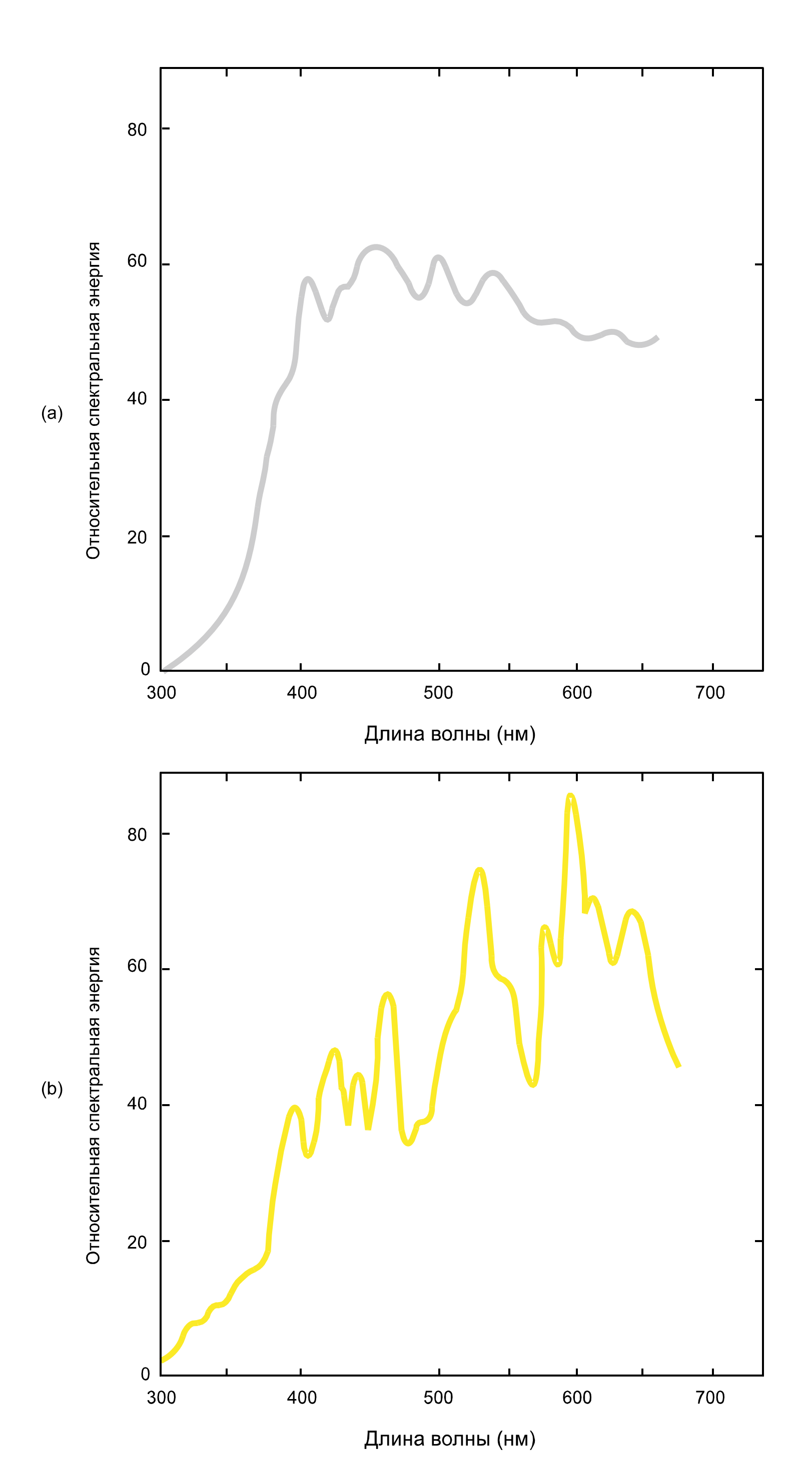


Рис. 10.13 Кривые относительного спектрального распределения энергии угольных дуговых источников света: (a) — спектр угольного дугового источника белого горения, аппроксимирующий усредненный спектр дневного света; (b) — спектр угольного дугового источника желтого горения с коррелированной цветовой температурой около 3200 К.

если расположить вспышку в нескольких десятках сантиметров от объектива камеры; кроме того, эффект красных глаз становится все менее и менее выраженным по мере роста уровня окружающего освещения, поскольку уменьшение диаметра зрачков понижает внутриглазную освещенность, а следовательно, и долю отраженного света. Именно поэтому некоторые камеры дают серию коротких предварительных вспышек, уменьшающих диаметр зрачков *до того*, как сработают затвор фотоаппарата и основная вспышка.

10.11 КОРРЕЛИРОВАННАЯ ЦВЕТОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Когда относительное спектральное распределение энергии источника света точно соответствует спектральному распределению энергии планковского излучателя, температура этого источника именуется *температурой распределения*. Однако свет большинства источников не воспроизводит относительного спектрального распределения энергии планковского излучателя, но при этом часто имеет ту же цветность. В этом случае мы говорим о *цветовой температуре* источника света. В отношении прочих источников «белого» света говорят об их *коррелированной цветовой температуре*.

⇨ *Коррелированная цветовая температура источника света* — это температура (в градусах Кельвина) планковского излучателя, свет которого по зрительному ощущению максимально соответствует свету интересующего источника.

Отметим, что коррелированная цветовая температура является весьма полезным индикатором относительной синевы или желтизны источников света.

В таблице 10.4 даны коррелированные цветовые температуры наиболее широко распространенных источников. Там же даны соответствующие значения майред. Стоит сказать, что шкала майред все-таки находит свое применение, поскольку порой случается так, что равные интервалы майред-значений соответствуют равным отличиям по цветности (Knight, 1972).

Рис. 10.14 на $u'v'$-диаграмме демонстрирует линию цветностей планковского излучателя при различных его температурах (т.н. *локус цветностей планковского абсолютно черного тела*).

Для источников, цветность света которых лежит вне планковского локуса, коррелированные цветовые температуры вычислены как цветовые температуры планковского излучателя, при которых цветность света по uv-диаграмме лежит ближе всего к цветности интересующего источника (исторически сложилось так, что при оценке цветностей источников света вместо $u'v'$-диаграммы используется uv-диаграмма, описанная в разделе 8.6).

Коль скоро равные отрезки на uv-диаграмме представляют примерно равные отличия цветностей, результаты вычислений по данной методике весьма близки к тем, которые можно получить при непосредственном визуальном сравнении.

На рис. 10.15 даны цветности наиболее важных источников, а также, в виде увеличенной шкалы, фрагмент локуса цветностей планковского излучателя в диапазоне цветовых температур, имеющих наибольшее прикладное значение.

ТАБЛИЦА 10.4 Коррелированные цветовые температуры наиболее широко распространенных источников света

Источник света	Кельвины	Майред
Типичное северное небо	7500	133
Типичный средний дневной свет	6500	154
Люминесцентные лампы искусственного дневного света[1]	6500	154
Ксеноновые лампы (электронные фотовспышки или лампы непрерывного горения)	6000	167
Типичная смесь солнечного света со светом неба	5500	182
Синие лампы-вспышки	5500	182
Угольные дуговые источники кинопроекторов	5000	200
Свет Солнца при угловой высоте 20°	4700	213
Люминесцентные лампы холодного белого света[2]	4300	233
Свет Солнца при угловой высоте 10°	4000	250
Белые лампы-вспышки	3800	263
Белые люминесцентные лампы[3]	3500	286
Фотографические лампы накаливания	3400	294
Галогенные лампы накаливания	3300	303
Софиты	3200	312
Студийные лампы накаливания	3200	312
Люминесцентные лампы теплого дневного света	3000	333
Лампы накаливания заливающего света	3000	333
Бытовые лампы накаливания (от 100 до 200 Вт)	2900	345
Бытовые лампы накаливания (от 40 до 60 Вт)	2800	357
Солнечный свет на закате	2000	500
Пламя свечи	1900	526

[1] Иногда именуются «лампами северного света» или «цветопробными лампами».
[2] Иногда именуются «лампами дневного света».
[3] Иногда именуются «лампами естественного света».

10.12 ЦВЕТОВОСПРОИЗВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

10.12.1 Общий индекс цветопередачи

Источники с разным спектральным распределением энергии обладают разными цветовоспроизводящими свойствами (поэтому качество освещения по данному критерию, даваемое натриевыми лампами, испускающими исключительно монохроматический свет, очень плохое). С появлением люминесцентных ламп, у которых относительное спектральное распределение энергии варьирует в весьма широком диапазоне, воз-

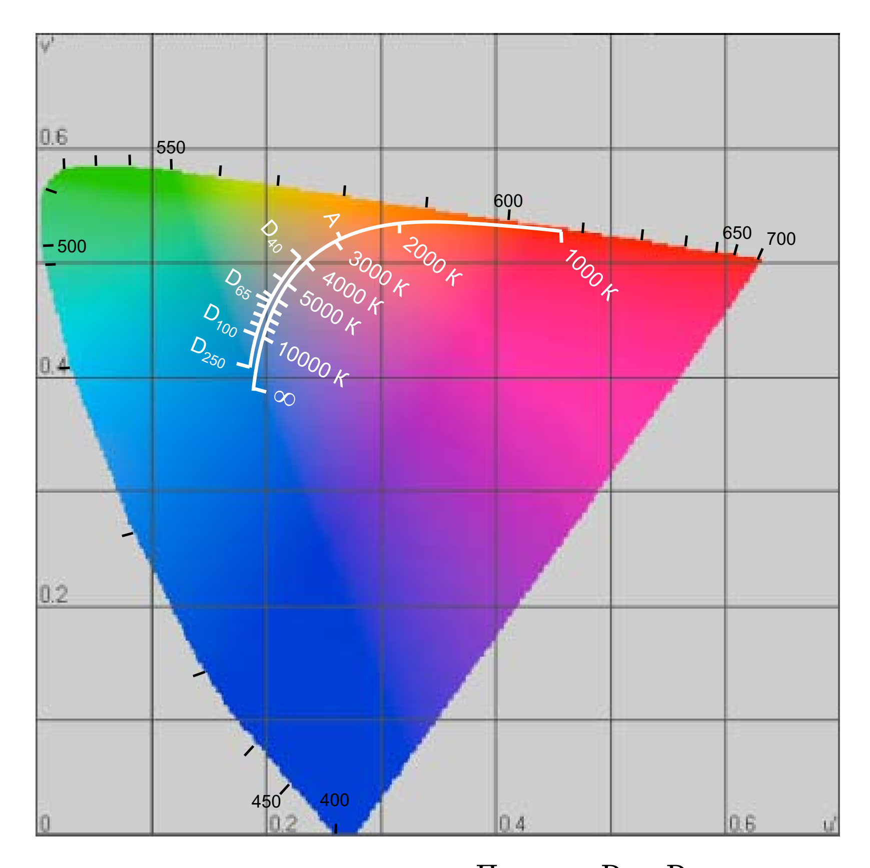


Рис. 10.14 Цветности планковского излучателя. Позиции D_{40}—D_{250} представляют цветности стандартных CIE D-осветителей с коррелированными цветовыми температурами от 4000 K до 25000 K.

никла необходимость в разработке способов количественной оценки того, насколько удовлетворительной (или неудовлетворительной) является результат цветовоспроизведения изображением, освещенным интересующим нас источником.

В 1965 г. CIE позиционировала т.н. *общий индекс цветопередачи* (R_a) — GCRI (General Color Rendering Index):

$$R_a = 100 - \frac{4.6}{8}(d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7 + d_8)$$

где d_1 — это расстояние между точками на *uv*-диаграмме, представляющими позиции цветовых стимулов, полученных от поверхности, имеющей тот же спектральный коэффициент отражения, что и у манселловского образца 7.5R 6/4[1]; $d_1 \ldots d_8$ — аналогичные расстояния между точками, представляющими позиции цветовых стимулов, полученных от поверхностей с теми же спектральными коэффициентами отражения, что и у манселловских образцов 5Y6/4, 5GY6/8, 2.5G6/6, 10BG6/4, 5PB6/8, 2.5P6/8 и 10P6/8 (CIE, 1965).

Вычисление общего индекса цветопередачи начинается с того, что рассчитываются координаты цветности образца при интересующем источнике, затем координаты того

[1] Напомним: манселловский цветовой тон — 7.5R; манселловская светлота — 6; манселловская насыщенность — 4.

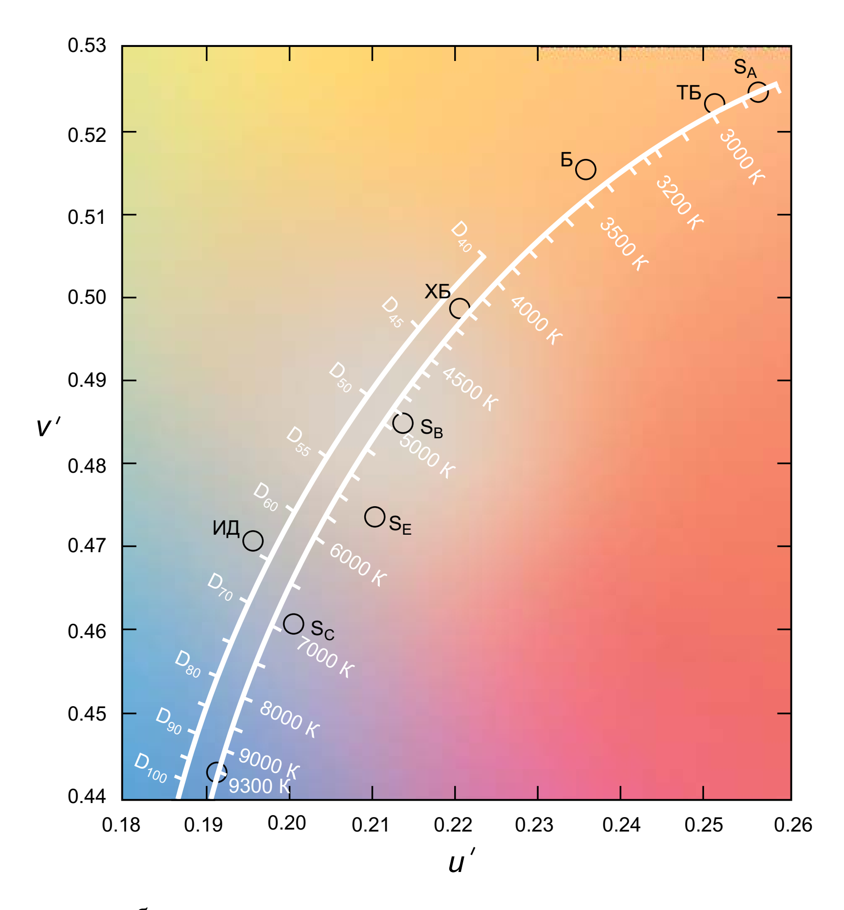


Рис. 10.15 Цветности наиболее важных источников света совместно с локусом цветностей планковского излучателя при аналогичных коррелированных цветовых температурах ($u'v'$-диаграмма, увеличенный фрагмент). Люминесцентные лампы: ТБ — теплого белого света; Б — белого света; ХБ — холодного белого света; ИД — искусственного дневного света. Позиции D_{40}—D_{100} представляют цветности стандартных CIE D-осветителей с коррелированными цветовыми температурами от 4000 К до 10000 К.

же образца при CIE D-осветителе с цветностью, ближайшей к цветности интересующего источника (за исключением источников с коррелированной цветовой температурой ниже 5000 К, в отношении которых вместо D-осветителя используется планковский излучатель). Полученное значение умножается на 800. Коэффициент 800 введен для того, чтобы согласовать полученные значения со значениями на шкалах $U^*V^*W^*$-пространства, в котором цветности всех стимулов умножены на $13W^*$, и коль скоро манселловская светлота 6 соответствует W^*-значению 61, то $13W^*$ примерно равно 800 (uv-диаграмма описана в разделе 8.6, а $U^*V^*W^*$-пространство — в разделе 8.8).

В 1973 г. методика расчета общего индекса цветопередачи была пересмотрена. Теперь по каждому из восьми манселловских образцов описанным выше стандартным путем рассчитывается т.н. *специальный индекс*, а затем полученные значения усредняются (CIE, 1973). Такой метод вычисления GCRI позволяет включать в расчет манселловские образцы разной светлоты. Новый способ задействует более продуманную методику учета эффектов различия в цветностях тестируемого источника и D-осветителя (или планковского излучателя).

Альтернативно: цветовоспроизводящие свойства источников света можно выразить в показателях степени отличия распределения энергии тестируемого источника,

ТАБЛИЦА 10.5 Спектрально-широкополосное выражение индекса цветопередачи

Полоса	Ширина полосы (нм)	Интенсивность по полосам при 100 лм D_{65}	Интенсивность по полосам при 100 лм D_{50}
УФ I	300—340	11.2 мВт	4.70 мВт
УФ II	340—400	43.2 мВт	22.4 мВт
1	400—455	0.79 лм	0.57 лм
2	455—510	11.2 лм	9.60 лм
3	510—540	23.1 лм	21.8 лм
4	540—590	43.7 лм	44.2 лм
5	590—620	14.4 лм	15.8 лм
6	620—760	6.80 лм	8.01 лм

оцененного по серии широких спектральных полос, от оцененного по этим же полосам распределения энергии соответствующего D-осветителя. Выбранные полосы, а также спектральные энергии по каждой полосе для D_{65}- и D_{50}-осветителей даны в табл. 10.5. В этой же таблице даны параметры двух полос ультрафиолетового излучения, поскольку учет UV-содержимого света источников важен в отношении образцов, содержащих оптические отбеливатели или иные люминесцентные добавки.

10.12.2 Специальный индекс цветопередачи

Т.н. *специальный индекс цветопередачи* (CIE) — SGCRI (Special Color Rendering Index) рассчитывается по конкретному интересующему образцу с помощью уравнения:

$$R_i = 100 - 4.6 d_i,$$

где d_i — это расстояние, измеренное в $U^*V^*W^*$-пространстве между позициями цветовых стимулов, полученных при освещении интересующего образца светом тестируемого источника и светом ближайшего D-осветителя (для источников с коррелированной цветовой температурой ниже 5000 К — планковского излучателя).

10.12.3 Коэффициент погрешности и коэффициент добротности цветопередачи

Т.н. *коэффициент погрешности цветопередачи* (S) можно рассчитать по методу, показанному в табл. 10.6 на примере сравнения лампы искусственного дневного света с D_{65}-осветителем; *коэффициент добротности цветопередачи* можно получить вычитанием величины «S» из 1024 или 914 (на выбор). Величина «S» — это сумма величин превышений допусков на процентное отличие между полосами.

Допуски таковы: ±10% для единичных полос и ±5% для среднего процентного отличия в парах смежных полос. Допуски по источникам искусственного дневного све-

ТАБЛИЦА 10.6 Пример вычисления коэффициента добротности цветопередачи с помощью спектрально-широкополосного метода

Спектральная полоса (нм)	Полосная ф/м яркость тестового источника	Полосная ф/м яркость D65	Отношение полосных яркостей	Девиация по полосе (%)	Девиация по паре полос (%)	Превышение допуска
400-455	0.864	0.79	1.09	+9		0
					−2	0
455-510	9.78	11.2	0.87	−13		3
					−13	8
510-540	20.2	23.1	0.88	−12		2
					−1	0
540-590	48.6	43.7	1.11	+11		1
					+2	0
590-620	13.4	14.4	0.93	−7		0
					−1	0
620-670	7.12	6.8	1.05	+5		0

Коэффициент добротности = 1024 − 14 = 1010 или 914 − 14 = 900.

Сумма превышений (S) = 14

та, предназначенным для визуальной оценки окраски отражающих образцов (см. разделы 27.9 и 27.10) иногда указывают в процентах стандартной девиации: ±15% для единичных полос и ±7.5% для пар смежных полос, а также по ±30% для каждой из ультрафиолетовых полос (British Standard 950:1967).

В табл. 10.7, наряду с прочими величинами, даны общие CIE-индексы цветопередачи некоторых ламп. Отметим, что таблица 10.7 предназначена для того, чтобы дать читателю общую картину R_a-значений, которых можно ожидать от света различных источников, однако приведенные значения R_a (равно как и значения цветовых температур и светоотдачи) у фактических ламп могут оказаться иными, поскольку такие факторы, как мощность, реальная температура и срок службы, весьма вариабельны. Общая же тенденция такова: чем выше светоотдача лампы, тем обычно ниже значение ее индекса цветопередачи (Davies, Jackson и Rogers, 1972; Moore, Stott, Davies и Halstead, 1973).

10.13 ЭФФЕКТ ВИЗУАЛЬНОЙ КЛАРИФИКАЦИИ

Давно замечено, что когда при свете некоей специфической лампы визуальная чистота цвета большинства объектов сцены растет, то в целом сцена будет выглядеть более яркой, чем с тем же уровнем освещенности, но при обыкновенной лампе (Thornton, 1972). Следовательно, трехполосная люминесцентная лампа визуально будет давать больше света, чем обыкновенная лампа с такой же фотометрической светоотдачей. Сей феномен часто именуют *эффектом визуальной кларификации,* и возникает он, в частности, благодаря тому, что полнота цвета объектов сцены обычно растет по мере роста общего уровня ее фотометрической освещенности (Boyce и Lynes, 1976; Hunt, 1979)[1].

[1] Что известно как «эффект Ханта». — *Прим. пер.*

ТАБЛИЦА 10.7 Свойства некоторых источников света

Вид источника	Цветовая температура (К)	Индекс цветопередачи GCRI (R_a)	Светоотдача (лм/Вт)
Лампа накаливания (240 В, 40 Вт)	2650	100	12
Лампа накаливания (240 В, 500 Вт)	3200	100	25
Металло-галогенная лампа	3200	100	25
Дневной свет (D_{65})	6500	100	—
Ксеноновая лампа высокого давления	5290	93	25
Люминесцентная лампа:			
— искусственного дневного света	6500	94	32
— 3800 Deluxe	3800	92	46
— естественного дневного света	3800	85	52
— теплого белого света класса Deluxe	3000	80	48
— белого света	3500	56	72
— теплого белого света	3000	54	71
— трехполосная	4000	85	93
Ртутная цветокорректированная лампа (MBF — mercury bulb fluorescent — кварцевая трубка с парами ртути высокого давления, помещенная в колбу с внутренним люминесцентным покрытием)	3830	44	60
Натриевая лампа высокого давления	2100	21	110
Металло-галогенная лампа (MBI — Metal bulb Iodide — кварцевая трубка с парами ртути высокого давления, помещенная в колбу, заполненную галогенидами металлов):			
Dy, Na, Tl, In	6430	88	85
Dy, Tl, In	6750	86	85
Sn (+Br)	5010	84	45
Na, Tl, In, Li	4640	69	80—100
Se, Na, Th	4300	66	75—100
Na, Tl, In	4500	64	90—100
Na, Tl, In	5300	62	90—100
HMI-лампа	6430	80	70

10.14 ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Свет большинства источников *неполяризован*, и направление его т.н. *поперечных колебаний* случайно. Свет, зеркально отраженный от неметаллических поверхностей, *поляризован*. Согласно *закону Брюстера*, при показателе преломления $n = 1.5$ угол падения и угол отражения поляризованного света равны примерно 57° (или примерно 53° при $n = 1.3$), а поперечные колебания идут в одном определенном направлении. По мере отклонения угла от брюстеровских значений степень поляризации плавно снижается.

Для устранения паразитных отражений от неметаллических поверхностей применяются специальные *поляризационные фильтры*, которые задают колебаниям пропущенного ими света определенное направление, поглощая при этом свет, колебания которого перпендикулярны заданному направлению.

Паразитные отражения от металлических поверхностей могут быть устранены аналогичным образом, но в этом случае поляризационные фильтры должны устанавливаться как на источнике света, так и на объективе камеры.

При фотосъемке поляризационные фильтры используются для затемнения синевы неба, поскольку свет от него частично поляризован.

Наконец, отметим, что свет, исходящий от жидкокристаллических мониторов (см. раздел 21.8), поляризован и, если не были приняты специальные меры, поляризация может исказить колориметрические данные.

10.15 СВЕТОДИОДЫ

Светодиоды (Light Emitting Diodes — LEDs) обладают рядом полезных свойств, в частности: долгим сроком службы и почти полным отсутствием нагрева при свечении. Спектр излучения светодиодов — это полоса шириной порядка 40 нм, в результате чего свет, испускаемый диодами, ярко окрашен.

Светодиоды весьма успешно используются в качестве сигнальных огней, в частности в качестве синих габаритов у автомобилей. Светодиоды могут применяться также для красного, зеленого и желтого сигналов светофора.

«Белый» свет можно получить комбинацией светодиодов разных спектров, но если используются только два типа диодов, например красный и голубой, спектральное распределение энергии будет слишком сильно отличаться от такового у обычных источников белого света, которые выдают определенное количество световой энергии по всем длинам волн видимого спектра. И даже тогда, когда для получения белого света объединяют красный, зеленый и синий светодиоды (или синий светодиод с люминофором), результирующее спектральное распределение энергии светового потока все равно будет радикально отличаться от распределения энергии света полноспектрального источника.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Aldington, J.N., Trans. Illum. Eng. Soc., 19, 319 (1954).
Aldworth, R.C., Light and Lighting, 64, 154 (1971).
Aldworth, R.C., Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 84, 70 (1975).
Aldworth, R.C., and Beeson, E.J.G., Brit. Kinematog. Sound Tel., 53, 222 (1971).
Beeson, E.J.G., Bocock, W.A., Castellain, A.P., and Tuck, F.A., Brit. Kinematography, 32, 59 (1958).

Beeson, E.J.G., and Robinson, K.G., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 212 (1969).
Boyce, P.R., and Lynes, J.A., Proc. CIE 18th Session, London, CIE Publication No. 36, p. 290 (1976).
British Standard 950: 1967, Artificial daylight for the assessment of colour. Parts I and II (1967).
CIE Publication No. 13, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources (1965 and 1973).
Condit, H.R., and Grum, F., J. Opt. Soc. Amer., 54, 937 (1964).
Crawford, B.H., Brit. J. Appl. Phys., 14, 319 (1963a).
Crawford, B.H., Trans. Illum. Eng. Soc. (London), 28, 50 (1963b).
Davies, I.F., Jackson, M.G.A., and Rogers, B.C., Lighting Research and Technology, 4, 181 (1972).
Dull, R.B., and Kemp, J.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 65, 432 (1956).
Harding, H.G.W., J. Sci. Instrum., 29, 145 (1952).
Harding, H.G.W., and Lambert, G.E.V., Nature, 167, 436 (1951).
Henderson, S.T., and Hodgkiss, D., Brit. J. Appl. Phys., 14, 125 (1963).
Henderson, S.T., and Hodgkiss, D., Brit. J. Appl. Phys., 15, 947 (1964).
Holloway, F.P., Plaskett, C.A., Dull, R.B., and Handley, C.W., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 64, 657 (1955).
Hull, J.N., Trans. Illum. Eng. Soc. 19, 21 (1954).
Hunt, R.W.G., Lighting Research and Technology, 11, 175 (1979).
Hurvich, L.M., and Jameson, D., J. Opt. Soc. Amer., 41, 521, 528, and 787 (1951).
Jones, L.A., and Condit, H.R., J. Opt. Soc. Amer., 38, 123 (1948).
Judd, D.B., MacAdam, D.L., and Wyszecki, G., J. Opt. Soc. Amer., 54, 1031 (1964)
Kaufman, A., and Sauter, D., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 83, 20 (1974).
Keeling, D., Brit. J. Phot., 116, 329 (1969).
Knight, R.E., J. Roy. Television Soc., 14, 39 (1972).
Levin, R.E., and Westlund, A.E., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 75, 589 (1966).
MacAdam D.L., J. Opt. Soc. Amer., 48, 832 (1958).
Middleton, W.E.K., J. Opt. Soc. Amer., 44, 793 (1954).
Moon, P., J. Franklin Inst., 230, 583 (1940).
Moore, J.R., Stott, P., Davies, I.F., and Halstead, M.B., Lighting Research and Technology, 5, 17 (1973).
Murray, H.D., Colour in Theory and Practice, Chapman & Hall, London, p. 205 (1952).
Palmer, D.A., N.P.L. Quarterly, page 2 (July to September, 1965).
Pitt, F.H.G., and Selwyn, E.W.H., Phot. J., 78, 115 (1938).
Ranby, P.W., Light and Lighting, 61, 227 (1968).
Samuelson D.W., Brit. Kinematog. Sound Tel., 59, 314 (1977).
Strange, J.W., and Stewart, J., Trans. Illum. Eng. Soc., 28, 91 (1963).
Struder, F.J., and Van Beers, R.F., J. Opt. Soc. Amer., 54, 945 (1964).
Taylor, A.H., and Kerr, G.P., J. Opt. Soc. Amer., 31, 3 (1941).
Thornton, W.A., J. Opt. Soc. Amer., 62, 457 (1972).
Uffers, H., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 67, 389 (1958).
Zubler, E.G., and Mosby, F.A., Illum. Engr., 54, 734 (1959).

ЛИТЕРАТУРА

Barrows, W.E., Light, Photometry, and Illuminating Engineering, McGraw Hill, New York (1951).
Cayless, M.A., and Marsden, A.M., Lamps and Lighting, 4th Edn., Arnold, London (1997).
Edwards, E.F., and Burgin, R., Phot. J., 106, 319 (1966).

Henderson, S.T., Daylight and its Spectrum, 2nd. Edn., Hilger, Bristol (1970).

Johnson, A.J., and Scott-Taggart, M., Guidelines for Choosing the Correct Viewing Conditions for Colour Publishing, PIRA, Leatherhead (1993).

Moon, P., The Scientific Basis of Illuminating Engineering, McGraw Hill, New York (1936).

Murray, H.D., Colour in Theory and Practice, Chapman & Hall, London (1952).

Stimson, A., Photometry and Radiometry for Engineers, Wiley, New York (1974).

Walsh, J.W.T., Photometry, Constable, London (1953).

Wyszecki, G., and Stiles, W.S., Color Science, 2nd. Edn., Wiley, New York (1982).

11 УРОВНИ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

11.1 ВВЕДЕНИЕ

В оценке результатов цветовоспроизведения, выполненного каким угодно способом, последнее слово всегда остается за человеком, проводящим визуальное тестирование изображения. Однако «сколько людей — столько мнений», и, когда качество репродукции оказывается неудовлетворительным, обычные наблюдатели чаще всего не могут внятно объяснить, что именно им не нравится. Тренированные наблюдатели способны более компетентно озвучить погрешности того или иного изображения, но они же часто оказываются избыточно чувствительными к недочетам определенных категорий (тех, что преобладали в их опыте), пропуская порой дефекты, очевидные наблюдателю неискушенному. Нами же, несмотря на все предстоящие сложности, должен быть рассмотрен сугубо научный подход к данной проблеме.

11.2 ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

11.2.1 Метод парного сравнения

Когда стоит задача оценить качество изображения той или иной сцены, то совокупность независимых наблюдательских суждений дает количественную оценку этого изображения. К примеру, если из 50 наблюдателей 35 отдали предпочтение изображению «A», 10 — изображению «B» и пятеро заявили, что изображения «A» и «B» примерно одинаковы по качеству воспроизведения сцены, — результаты голосования можно толковать как количественную меру субъективных отличий между A- и B-изображениями по критерию качества последних. Аналогичные суждения можно высказать в отношении большего числа пар изображений той же сцены, например: «A» и «C», «B» и «C», «A» и «D», «B» и «D», «C» и «D» и т.д. Общее количество предпочтений по каждому изображению будет представлять собой *индекс* их качества.

Данный метод, именуемый *методом парного сравнения*, — очень эффективный инструмент, позволяющий дать исчерпывающее заключение на основе малого числа проб. Однако при большой выборке репродукций-претендентов оценка превращается в долгое и утомительное занятие, поэтому в таких ситуациях практичнее и удобнее прибегать к т.н. *методу одновременного сравнения*.

11.2.2 Метод одновременного сравнения

При одновременном сравнении наблюдателям сразу предъявляют все варианты репродукций и просят распределить их по некоей шкале (Allnatt, 1965, 1966, 1968; Corbett, 1970), к примеру:

— приемлемо,
— сомнительно,
— неприемлемо;
или:

— отлично,

— хорошо,

— удовлетворительно,

— неудовлетворительно,

— плохо.

И в том, и в другом случае мы получим набор точек, произвольно распределенных по категориям качества, к примеру: 1, 0.5, 0 по первому варианту или 4, 3, 2, 1, 0 — по второму. Общее число точек по каждой репродукции, набранное от всех наблюдателей, выражается в виде процентной доли от максимально возможного числа точек по ней (которое было бы получено в случае высшей оценки изображения всеми наблюдателями). Таким образом, проценты, полученные описанным путем, также дают количественную оценку качества репродукций-претендентов.

Единственная сложность в реализации метода одновременного сравнения состоит в том, что у наблюдателей разное внутреннее представление о сцене (т.н. *ментальный стандарт*), и каждое изображение-претендент оценивается в сравнении именно с этим стандартом. Вместе с тем компенсировать влияние описанного фактора можно предъявлением изображений в случайном порядке и со случайным набором их внешнего оформления.

Дополнительно можно попросить наблюдателей численно прошкалировать изображения по таким перцепционным критериям, как резкость, зернистость, контрастность и пр. (Bartleson, 1981).

11.3 ПОЛНАЯ ОЦЕНКА

Описанные выше методы пригодны для *визуального* сравнения репродукций и помогают ответить на вопрос «Каковы слабые места данной цветовоспроизводящей системы?». Однако *количественный* прогноз поправок, необходимых для отладки этой системы, требует подхода колориметрического, сопряженного с серьезными трудностями. Поэтому, прежде чем применять колориметрию, необходимо четко определить цель работы цветовоспроизводящей системы. Проще говоря, основным назначением текущей главы является разговор о шести возможных уровнях (целях) цветовоспроизведения: *спектральном*, *колориметрическом*, *точном*, *эквивалентном*, *согласованном* и *выделенном*. Отметим, что задачей цветовоспроизведения в разных областях его применения может стать достижение только какого-либо одного из перечисленных уровней.

11.4 СПЕКТРАЛЬНОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Типичным примером востребованности спектрального цветовоспроизведения может являться печать торгового каталога, при которой желательно, чтобы цветовые ощущения от изображенных в нем товаров были идентичны цветам товаров оригинальных. Также желательно, чтобы равенство восприятия сохранялось при смене спектрального состава освещения, к примеру: когда потенциальный покупатель рассматривает каталог на дневном свету, цвета изображений товаров должны соответствовать цвету их оригиналов на дневном свету, и когда те же каталог и товары сравниваются при свете ламп накаливания — цветовое соответствие должно сохраниться. Иными словами, когда результат цветового восприятия оригиналов по каким-либо причинам меняется, синхронно должен измениться и цвет их изображений в каталоге. Более

того, сказанное должно относиться ко всем прочим вариантам освещения, вплоть до освещения люминесцентными лампами.

Независимость цветового соответствия от спектрального состава освещения обеспечивается только в том случае, когда кривые спектрального коэффициента отражения поверхности оригинала и поверхности копии — идентичны. Сие и будет представлять собой *спектральное цветовоспроизведение* (Hunt, 1970), то есть:

⇨ *Спектральное цветовоспроизведение* — это процесс достижения равенства спектральных коэффициентов отражения (пропускания) элементов репродукции спектральным коэффициентам отражения (пропускания) объектов оригинальной сцены.

Отметим, что концепция спектрального цветовоспроизведения применима и к самосветящимся изображениям (телевидение). В этом случае спектральное цветовоспроизведение определимо как процесс достижения равенства относительных спектральных распределений энергии воспроизводимых цветовых стимулов спектральному распределению энергии стимулов, создаваемых объектами реальной сцены при данном освещении.

Важной особенностью равенства кривых спектрального коэффициента отражения поверхностей (или кривых спектрального распределения энергии) является гарантия того, что цветовое равенство элементов репродукции соответствующим объектам оригинала будет сохраняться у всех наблюдателей (при условии, что все они находятся в одних и тех же условиях просмотра) вне зависимости от состояния их цветового зрения.

Реализовать спектральное цветовоспроизведение можно только двумя способами — методом Липпмана и микродисперсионным методом, речь о которых шла в разделах 1.3 и 1.4. Однако оба способа крайне непрактичны.

Отметим, что голубой, пурпурный и желтый фотографические красители не в состоянии обеспечить спектральный уровень, за исключением отдельных специфических стимулов; то же относится и к полиграфии (хотя нельзя не сказать, что дополнительная черная краска чуть в большей степени приближает систему к спектральной); и то же касается телеприемников: кривые спектрального распределения энергии света люминофоров таковы, что спектральное распределение энергии воспроизводимых стимулов, как правило, заметно отличается от спектрального распределения энергии стимулов оригинальных.

Более того, можно уверенно говорить о том, что с точки зрения спектрального цветовоспроизведения современные системы становятся все хуже и хуже, к примеру: чтобы увеличить цветовой охват воспроизводимых стимулов и в целом улучшить цветопередачу, фотографические красители стремятся изготавливать все более спектрально-селективными, а это означает, что воспроизведение светлых и околонейтральных стимулов все дальше от спектрального.

Сказанное проиллюстрирует рис. 11.1: большинство реальных серых объектов спектрально-неселективны, и горизонтальная линия «a» представляет кривую спектральной оптической плотности идеального серого предмета; то, как этот серый объект был бы воспроизведен фотопленкой устаревшего типа, демонстрирует пунктирная линия «b»; сплошная линия «c» — это результат воспроизведения современной фотопленкой. Мы видим при этом, что воспроизведение серого стимула новой пленкой дальше от спектрального, чем воспроизведение пленкой старого образца, то есть совре-

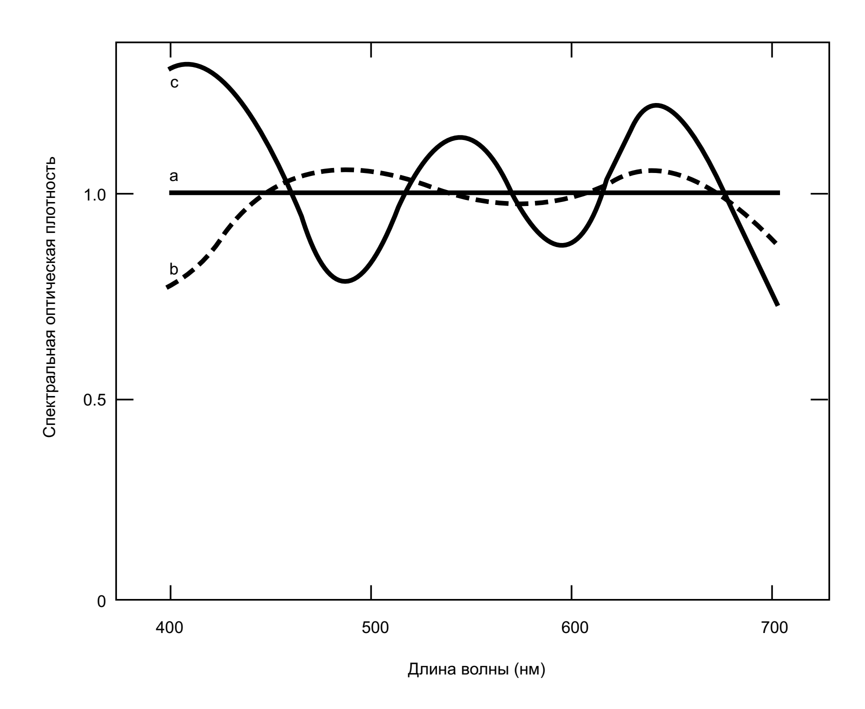


Рис. 11.1 Кривые спектральной оптической плотности: (a) — идеального серого объекта; (b) — серого, воспроизведенного цветной фотопленкой устаревшего типа; (c) — серого, воспроизведенного современной цветной фотопленкой.

менные пленки быстрее теряют цветовое соответствие при изменениях в спектральном составе их просмотровой подсветки.

Напомним, что стимулы, идентичные друг другу по трихроматическому воздействию на зрительную систему человека, но отличные по спектральному составу, именуются *метамерами* (см. раздел 7.3). Сие свойство могло быть кстати, если бы *метамеризм* (то есть степень отличия спектральных составов визуально неотличимых стимулов) был измеряем. Однако сегодня не существует общего метода его численной оценки.

Исключение составляют источники света: в отношении пары любых осветителей метамеризм можно измерить в показателях величины визуального несоответствия двух отражающих образцов идентичных друг другу по восприятию при одном осветителе (эталонный осветитель), но различных при другом (тестируемый осветитель).

В середине XX века Пинней и Де-Марш эмпирически определили, что в цветной фотографии общий эффект метамеризма осветителя можно «минимизировать», если репродукционные CMY-красители подобрать так, что минимумы спектральных оптических плотностей воспроизводимого ими серого (приходящиеся приблизительно на 500 и 600 нм) окажутся примерно равными друг другу (Pinney и DeMarsh, 1963).

Теоретически все сказанное выше справедливо и в отношении наблюдательского метамеризма, но требует определенной проверки, скажем за счет вычислений на основе т.н. *Стандартного девиантного наблюдателя* (см. стр. 120 Hunt, 1998).

Наконец, отметим, что в последние годы телевидение тоже всерьез отклонилось от спектрального принципа, начав использовать редкоземельный красный люминофор (см. рис. 11.2).

Итак, все практикуемые ныне методы цветовоспроизведения, будь то фотография, телевидение или печать, как правило, не в состоянии обеспечить уровень спектрального

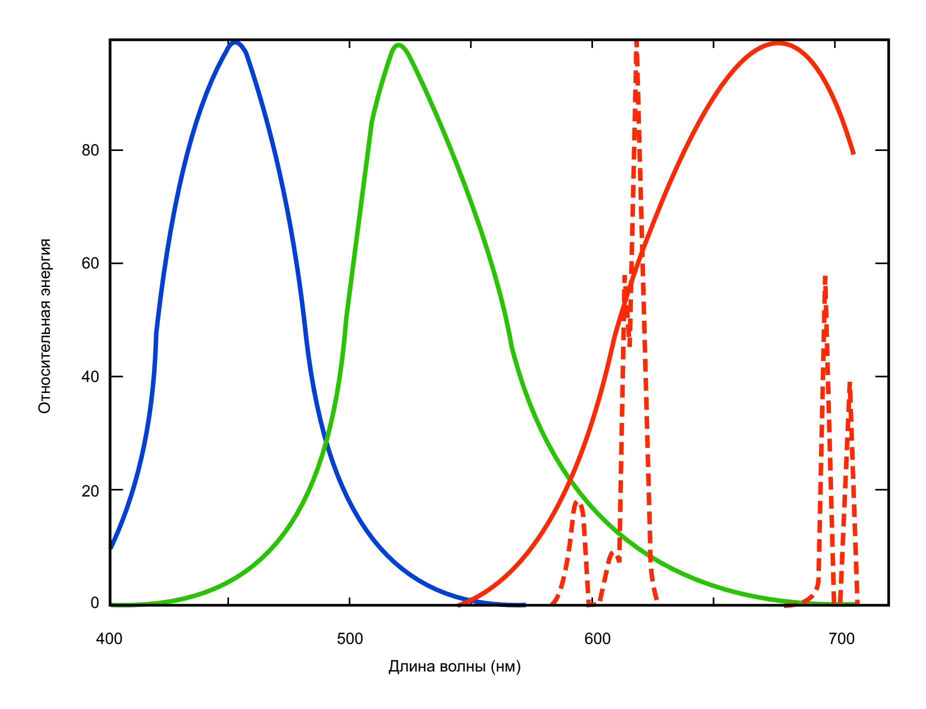


Рис. 11.2 Кривые спектрального распределения энергии телевизионных люминофоров. Сплошные синяя, зеленая и красная линии — сульфидные люминофоры; пунктирная линия — люминофор на основе европий-иттрий ванадата. Использование последнего вместо сульфида усиливает метамерность стимулов, воспроизводимых телеприемником.

цветовоспроизведения; исключение составляет тот случай, когда сам оригинал состоит из смеси воспроизводящих пигментов, красителей или люминофоров.

Отметим, однако, что концепция спектрального цветовоспроизведения все же не совсем забыта и к ней прибегают тогда, когда выдвигаются требования независимости визуального равенства оригинала и его изображения от спектрального состава освещения и/или особенностей цветового зрения наблюдателей.

Наконец, отметим, что степень чувствительности любой цветовоспроизводящей системы к перечисленным факторам можно оценить, рассматривая, как влияют на конечный результат специфические изменения в освещении и/или наблюдателе.

11.5 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Исключить из практических ситуаций метамеризм наблюдателя невозможно, но доподлинно известно, что когда колориметрические расчеты выполняются на базе Стандартного колориметрического двухградусного наблюдателя CIE, то их результаты, как правило, хорошо укладываются в оценку цветовых стимулов наблюдателями фактическими (не страдающими цветовыми аномалиями). Сей факт дает нам возможность колориметрически подобрать потенциальные репродукционные метамеры, которые по своему трихроматическому воздействию на зрительную систему наблюдателя будут соответствовать стимулам оригинальной сцены (или оригинального изображения сцены). Проще говоря, стимулы репродукции будут иметь те же CIE-цветности и относительные фотометрические яркости, что и стимулы оригинала. Сие и будет являться т.н. *колориметрическим цветовоспроизведением* (Clapper и DeMarsh, 1969).

⇨ *Колориметрическое цветовоспроизведение* — это процесс воспроизведения цветовых стимулов с теми же цветностями и теми же относительными фотометрическими яркостями, что и у стимулов оригинальной сцены.

При печати на отражение сказанное чаще всего предполагает, что и оригинал, и его репродукция освещены источниками с одинаковыми цветностями (спектральный состав света при этом может оказаться разным). Колориметрия обычно выполняется относительно ярко освещенного белого эталона (белой точки) оригинала и относительно копии этого белого эталона на репродукции. Такая процедура делает величины относительных фотометрических яркостей объектов оригинала и репродукции независимыми от интенсивности оригинального освещения или освещения репродукционного (в телевидении — фотометрической яркости элементов экранного изображения). Отметим, что данное упрощение ведет к некоторым ограничениям в работе цветорепродукционных систем (см. ниже), но при этом позволяет успешно применять ныне действующие формулы цветовых отличий.

Таким образом, для создания отражающих репродукций дневной сцены, предназначенных к просмотру при дневном свете, колориметрические расчеты могут выполняться с использованием стандартного осветителя, а отклонения от колориметрического цветовоспроизведения, в свою очередь, вычисляться с помощью формул цветовых отличий, рекомендованных CIE (Pitt, 1967).

Однако необходимо помнить, что важнее всего точность воспроизведения знаковых объектов реальных сцен (таких, как кожа, ясное небо, трава, листва, а также все серые предметы), и что погрешности по цветовому тону много серьезнее прочих вариантов ошибок. Таким образом, мы должны подчеркнуть разницу между *воспринимаемостью* и *приемлемостью* цветовых отличий.

Если бы цветовое восприятие элементов репродукции не зависело от интенсивности освещения, то концепция колориметрического цветовоспроизведения могла бы применяться ко всем случаям, когда оригинал и его репродукция освещаются источниками с одинаковой цветностью. Однако цветовое восприятие зрительных стимулов безусловно (и подчас очень сильно) зависит от интенсивности освещения, которое, как видно по табл. 11.1, имеет весьма широкий диапазон значений. Следовательно, **достижение уровня колориметрического цветовоспроизведения не означает достижения равенства в восприятии цветовых стимулов оригинала и копии**; плюс к тому помимо интенсивности освещения на восприятие стимулов оригинала и репродукции влияет еще ряд не менее важных факторов.

⇨ Колориметрическое цветовоспроизведение — это прерогатива и цель цветного фотокопирования.

11.5.1 Прикладные аспекты колориметрического цветовоспроизведения

Из вышесказанного следует, что влияние изменений в условиях просмотра оригинала и репродукции велико и сложно. Однако цветовое восприятие световой энергии, отраженной от объектов действительности, может оставаться до известной степени постоянным в более чем широком диапазоне изменений условий просмотра. Так происходит почти всегда, поскольку абсолютное большинство естественных объектов — это объекты отражающие и тем самым создающие т.н. *предметные цветовые стимулы* (в отличие от стимулов *самосветящихся*).

ТАБЛИЦА 11.1 Типичные уровни освещенности

ЕСТЕСТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ					
Яркое солнце	от	50 000	до	100 000	лк
Солнце в дымке	от	25 000	до	50 000	лк
Высокая облачность	от	10 000	до	25 000	лк
Средняя облачность	от	2000	до	10 000	лк
Низкая облачность	от	100	до	2000	лк
Закат	от	1	до	100	лк
Полная луна	от	0.01	до	0.1	лк
Свет звезд	от	0.0001	до	0.001	лк
ИСКУССТВЕННОЕ ОСВЕЩЕНИЕ					
Операционная	от	5000	до	10 000	лк
Витрины магазинов	от	1000	до	5000	лк
Чертежные бюро	от	300	до	500	лк
Офисы	от	200	до	300	лк
Жилые помещения	от	50	до	200	лк
Коридоры	от	50	до	100	лк
Хорошее уличное освещение			20		лк
Плохое уличное освещение			0.1		лк

Цветовое восприятие предметных стимулов скорее относительно, чем абсолютно, к примеру, если на некую серую поверхность сначала посмотреть при ярком солнечном свете (освещенность порядка 50000 лк), а затем при лампе искусственного дневного света (освещенность порядка 50 лк), то абсолютная фотометрическая яркость этой поверхности уменьшится в 1000 раз, и, хотя поверхность субъективно окажется гораздо менее яркой, то же коснется и прочих объектов поля зрения. В результате предмет так и останется серым, то есть величина визуальной «серости» в целом будет неизменной.

Сие свойство восприятия необходимо человеческому зрению для оценки значимых стимулов относительно стимулов, исходящих от прочих объектов поля зрения. Однако, поскольку в большинстве обычных просмотровых ситуаций поверхностные стимулы лишь весьма малого диапазона яркостей воспринимаются как белые (стимулы бóльших яркостей выглядят самосветящимися, меньших — светло-серыми), можно сделать упрощение, предположив, что цветовая оценка стимулов осуществляется зрением относительно белого (что и предполагается колориметрическим цветовоспроизведением) (Evans, 1959).

В середине XX века было обнаружено (Hunt, Pitt и Ward, 1969), что, оценивая результат воспроизведения серого именно относительно белого, можно уйти от многих сложностей, возникающих при необходимости воспроизведения по восприятию (см. гл. 6). К примеру, светло-серый объект на солнечном свету дает стимул такой субъективной яркости, что уравнять его на отпечатке, предназначенном к рассматриванию при искусственном освещении, совершенно невозможно. Однако если на отпечатке

объект будет воспроизведен как светло-серый, то такая тоновая коррекция даст вполне удовлетворительный результат.

Та же проблема возникает и в отношении полноты цвета изображений объектов: к примеру, если при солнечном свете на зрительную систему воздействуют некие стимулы высокой колориметрической чистоты, то вызванные ими ощущения будут обладать большей полнотой цвета, чем даже ощущения от монохроматических стимулов, но предъявленных при типичных уровнях искусственного освещения (Hunt, 1953). Казалось бы, по этой причине выполнить удовлетворительную цветовую репродукцию солнечных сцен, предназначенную к просмотру при искусственном освещении, — невозможно, — однако, как мы знаем, опыт свидетельствует об обратном.

Действительно, существуют все основания строить цветовоспроизведение, отталкиваясь от белого, и, следовательно, фотометрия яркостей относительно ярко освещенного белого эталона вполне оправданна. Итак: равенство *относительных* яркостей и равенство *относительных* цветностей мы и называем *колориметрическим цветовоспроизведением*.

Таким образом, достижение уровня колориметрического цветовоспроизведения — это хороший критерий качества отражающих отпечатков (при условии, что их окружение сходно с окружением оригинала), рассматриваемых при свете той же цветности, но обычно меньшей интенсивности, чем в оригинальной сцене. Однако нельзя забывать, что, поскольку субъективная яркость и полнота цвета меняются при смене уровня освещенности, всегда можно «поймать» тот ее уровень, при котором репродукция будет максимально близка к оригиналу по восприятию.

11.6 ТОЧНОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Когда в дополнение к равенству по цветностям и фотометрическим яркостям равными оказываются и абсолютные фотометрические яркости объектов оригинальной сцены и элементов ее репродукции, мы говорим о ситуации, при которой исключено отличие в освещенности обеих (или, в случае телевидения, — в экранной яркости). Сие представляет собой т.н. *точное цветовоспроизведение*. Следовательно:

⇨ *Точное цветовоспроизведение* — это процесс воспроизведения цветовых стимулов с теми же цветностями, относительными и абсолютными фотометрическими яркостями, что и у стимулов оригинальной сцены.

Результатом точного цветовоспроизведения является равенство трихроматических воздействий стимулов оригинала и его копии на зрительную систему наблюдателя, а также равенство ощущений, вызванных этими воздействиями. Последнее обеспечено равенством адаптаций зрительной системы в условиях просмотра оригинальной сцены и в условиях просмотра ее изображения (факторами, оказывающими основное влияние на адаптацию зрения, являются: фотометрическая яркость и цветность окружения стимула, угловой размер области стимуляции и паразитная подсветка; если все перечисленные условия одинаковы — адаптация будет одна и та же).

Таким образом, если воспроизведение данного зрительного стимула является *точным*, то, при одновременном соблюдении всех наиболее важных условий просмотра, результат цветового восприятия этого стимула наблюдателем будет ровно таким же, как результат восприятия соответствующего стимула оригинальной сцены.

Отличия же в восприятии возникнут в случаях, когда:

— условия просмотра оригинала и его репродукции различны;

— фактический наблюдатель ощутимо отличен от Стандартного колориметрического двухградусного наблюдателя CIE;

— спектральное распределение энергии осветителей несколько отличается от того, что было использовано при расчете цветностей и относительных фотометрических яркостей стимулов (то есть, когда имели место колориметрические погрешности).

⇨ Точное цветовоспроизведение — это прерогатива и цель абстрактных цветовоспроизводящих систем и цветопробных процессов (см. раздел 25.9).[1]

11.7 ЭКВИВАЛЕНТНОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Существует множество ситуаций, при которых достижение уровня колориметрического или точного цветовоспроизведения было бы ошибкой. К примеру, когда сцена, освещенная лампами накаливания, воспроизводится в расчете на просмотр при дневном освещении, то и колориметрическое, и точное цветовоспроизведения приведут к выраженному сдвигу общего хроматического баланса репродукции в желтую сторону. Такая ситуация обычно возникает в телевидении: если студийная сцена, освещенная лампами накаливания, воспроизводится экранами телеприемников на колориметрическом или точном уровнях, то при дневном просмотре она выглядит желтой. Так происходит из-за того, что зрительная система адаптирована в основном к дневному свету, поскольку он занимает бóльшую часть поля зрения, тогда как в оригинальной сцене зрение адаптировано к свету ламп накаливания, и, следовательно, по отношению к средневолновой («зеленой») чувствительности его коротковолновая («синяя») чувствительность повышена, а длинноволновая («красная») — понижена. (Оптимальным хроматическим балансом для телевизионных передач является баланс по смешанному освещению, о чем говорится в разделе 21.13).

Поскольку на цветовое восприятие световых потоков влияют параметры просмотра, в частности описанные выше, необходимо позиционировать четвертый уровень цветовоспроизведения — уровень *эквивалентный*.

⇨ *Эквивалентное цветовоспроизведение* — это процесс воспроизведения цветовых стимулов, при котором их цветности, относительные и абсолютные фотометрические яркости таковы, что в репродукционных условиях просмотра результат цветового восприятия этих стимулов идентичен результату цветового восприятия стимулов оригинальной сцены.

Существует как минимум три варианта обстоятельств, которые в данной связи имеют прикладное значение:

— отличия в цветностях оригинального и репродукционного осветителей;

— отличия в интенсивностях оригинального и репродукционного осветителей;

— отличия в окружениях оригинальной сцены и ее изображения.

Проиллюстрируем сказанное на примере результатов экспериментов по т.н. гаплоскопическому уравниванию (см. раздел 8.10).

На рис. 11.3 даны цветности нескольких пар физически разных стимулов, вызывающих одинаковые цветовые ощущения в той ситуации, когда стимулы (цветности

---

[1] Под «абстрактными цветовоспроизводящими системами» здесь подразумеваются системы оцифровки физических оригиналов; результатом работы этих систем является файл, содержащий данные о цветностях и фотометрических яркостях стимулов сцены. — *Прим. пер.*

которых отмечены точками) предъявлены в условиях адаптации по свету ламп накаливания (правый глаз), а эквивалентные им стимулы (на цветности которых указывают острия стрелок) — при адаптации по дневному свету (левый глаз). Мы видим, что стимул, который в условиях дневной адаптации вызовет точно такое же цветовое ощущение как некий другой стимул, предъявленный в условиях адаптации к свету ламп накаливания, должен содержать большее количество коротковолновой энергии (то есть быть синее при сравнении обоих стимулов в полной темноте). Такие стимулы именуются *эквивалентными стимулами*. Отметим, что в свое время были предложены уравнения расчета трехстимульных значений эквивалентных цветовых стимулов (Burnham, Evans и Newhall, 1957; Nayatani, Takahama и Sobagaki, 1981; Hunt, 1998; см. гл. 34).

На рис. 8.20 даны цветности нескольких эквивалентных стимулов при вариантах адаптации по освещениям одинаковой цветности, но разной интенсивности (Hunt, 1952 и 1953): мы видим, что по мере снижения интенсивности освещения и, следовательно, по мере снижения интенсивности тестовых стимулов снижается полнота цвета последних.

На рис. 13.7 показаны фотометрические яркости эквивалентных серых стимулов (от белого до черного), предъявленных в определенном диапазоне величин освещенности сцены (Hunt, 1965a): мы видим, что по мере снижения освещенности и вызванного им снижения интенсивности исследуемых предметных стимулов, понижается субъективная яркость последних, а также слегка падает визуальный контраст между стимулами (последнее иногда относят на счет нелинейности шкалы ординат, но ряд исследователей считает, что снижение контраста все же имеет место [Bartleson и Breneman, 1967 a]).

На рис. 11.4 дан пример влияния окружения: эквивалентные стимулы подобраны по серой шкале, предъявленной наблюдателю сначала на сером, а затем на черном фонах. Мы видим, что (как отмечалось в гл. 6) темное окружение ведет к повышению визуальной гамма (Hunt, 1965 b). Напомним при этом, что оно же может понизить полноту цвета элементов изображения (Hunt, 1950; Rowe, 1972; Hunt, 1973; Pitt и Winter, 1974; Breneman, 1977). Любопытно, что коррекция изображения, необходимая для компенсации падения визуального контраста и полноты цвета при тусклом или темном окружениях, в восприятии самого цветокорректора ведет к усилению тоновых и хроматических отличий репродукции от оригинала.

На рис. 11.5 дан пример влияния изменений в цветности и интенсивности освещения и в окружающих стимулах: эквивалентные стимулы были выявлены с помощью специальной тест-карты при ярком солнечном свете и при свете проектора с лампой накаливания; последнее имитировало проекционный просмотр изображения в темном окружении (Hunt, 1965 b). Понятно, что цветовое восприятие стимулов в обоих случаях было весьма различным, а ослабление света проектора вело к снижению полноты цвета образцов карты с одновременным хроматическим сдвигом в желто-оранжевую сторону. (Однако результаты данного эксперимента зависели в том числе и от специфического спектрального коэффициента отражения образцов: метамерные патчи карты, то есть образцы, имевшие одинаковые цветности на солнечном свету, но при этом различные кривые спектрального коэффициента отражения, продемонстрировали различную степень хроматического сдвига при переходе к свету проектора и, следовательно, имели иные эквивалентные стимулы. Вместе с тем общее направление изменений было таким же.)

Забегая вперед, скажем, что описанные выше эффекты можно спрогнозировать с по-

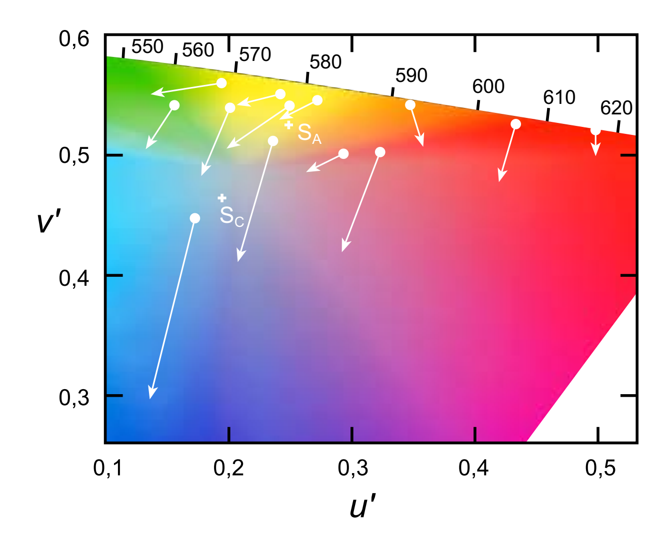


Рис. 11.3 Цветности стимулов, воспринимаемых одинаково при равных фотометрических яркостях адаптирующих полей (8.1 кд/м^2). При этом цветность правого адаптирующего поля (правый глаз) равна цветности Стандартного А-осветителя (цветности стимулов отмечены точками); цветность левого адаптирующего поля (левый глаз) равна цветности Стандартного осветителя С (цветности стимулов отмечены остриями стрелок).

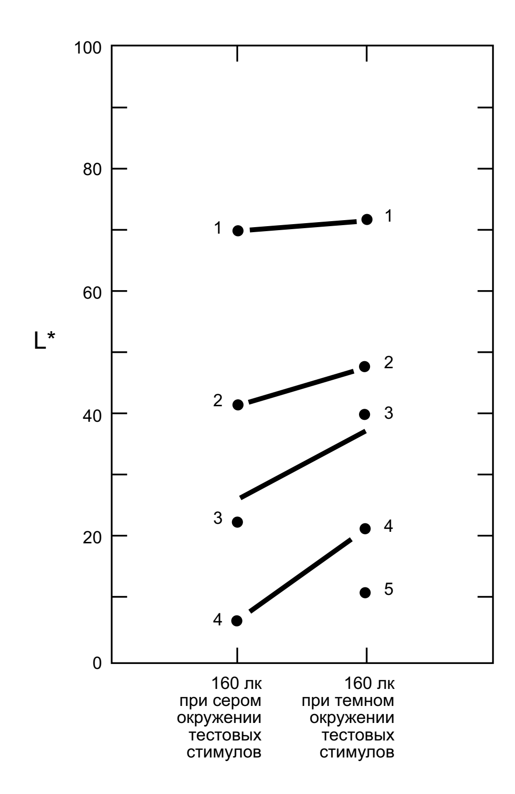


Рис. 11.4 Фотометрические яркости серых стимулов (отложены по CIE L^*-шкале), подобранные для правого глаза, при его адаптации по полю с яркостью 3600 кд/м^2 и коррелированной цветовой температурой 4000 К, с целью достижения визуальной эквивалентности нескольким серым стимулам в среднем (левая колонка) и темном (правая колонка) окружениях, последовательно предъявленным левому глазу, адаптированному к свету лампы накаливания при освещенности сцены 160 лк; благодаря темному окружению темно-серые образцы воспринимаются светлее, что снижает общий визуальный контраст серии.

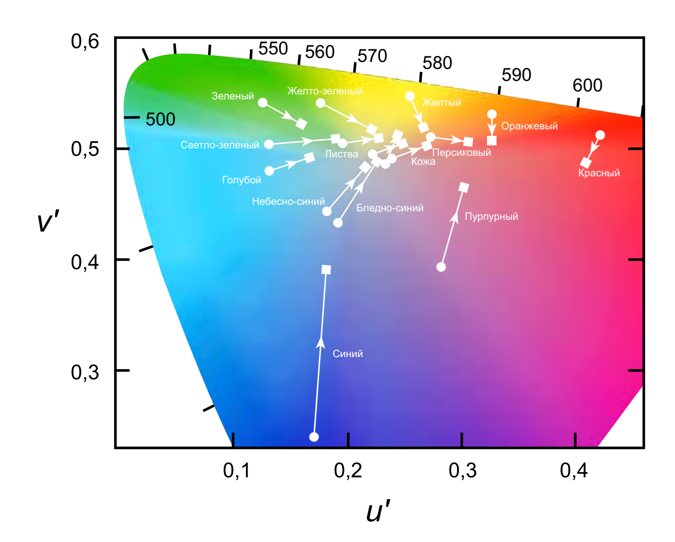


Рис. 11.5 ○ — цветности стимулов, подобранных для правого глаза при его адаптации по полю с фотометрической яркостью 3600 кд/м^2 и коррелированной цветовой температурой 4000 К с целью достижения визуальной эквивалентности 16-ти разным стимулам, последовательно предъявленным левому глазу при ярком солнечном свете с освещенностью сцены в 43000 лк; □ — цветности стимулов, подобранных для правого глаза (при тех же условиях его адаптации) с целью достижения визуальной эквивалентности 16-ти разным стимулам, последовательно предъявленным левому глазу при его адаптации по свету лампы накаливания (проектор) с освещенностью сцены 160 лк и темном окружении; стрелки указывают на снижение полноты цвета стимулов, предъявляемых левому глазу при переходе к тусклому свету проектора, и одновременное смещение их цветового тона в желто-оранжевую сторону.

Сопутствующие изменения в светлоте стимулов:

	Ощущение светлоты	
Цветовой стимул	**Яркое солнце**	**Свет проектора**
Белый	87	64
Желтый	79	75
Телесный	72	53
Песочный	68	43
Оранжевый	61	36
Светло-зеленый	61	32
Желто-зеленый	63	36
Персиковый	56	42
Небесно-синий	56	32
Бледно-синий	58	35
Цвета листвы	53	28
Красный	44	22
Пурпурный	40	19
Зеленый	41	13
Голубой	30	9
Синий	28	10

мощью т.н. *моделей цветового восприятия*, в частности CIECAM97s и CIECAM02 (см. гл. 35 и Приложение 6).

⇨ Эквивалентное цветовоспроизведение — это прерогатива и цель передачи изображений по интернет.

11.8 СОГЛАСОВАННОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

Дабы справиться с трудностями, возникающими на пути к колориметрическому и эквивалентному уровням (то есть трудностями, связанными с изменчивостью субъективной яркости и полноты цвета), нам следует обратиться к концепции т.н. *согласованного цветовоспроизведения*:

⇨ *Согласованное цветовоспроизведение* — это процесс воспроизведения цветовых стимулов, при котором их цветности и относительные фотометрические яркости таковы, что результат цветового восприятия этих стимулов оказывается тем же, что и у стимулов оригинальных, но при условии равенства освещенностей и/или интегральных яркостей оригинала и репродукции.

Учтя отличия в средних уровнях абсолютной фотометрической яркости оригинала и репродукции, как, скажем, в случае колориметрического цветовоспроизведения, мы уйдем от парадоксального вывода о невозможности воспроизведения изображений ярко освещенных сцен при низких уровнях освещенности отражающих репродукций (низких уровнях яркости телеизображений). Однако требование равенства по восприятию требует учета влияния на это равенство отличий в окружении и в цветности освещения. Пути учета влияния среднего, тусклого и темного окружений на восприятие белого, серого и черного стимулов показаны на рис. 11.6, взятом из гл. 6: оптические плотности элементов репродукции, необходимые для достижения согласованного цветовоспроизведения, отложены по оси ординат, а логарифмы относительных фотометрических яркостей объектов оригинальной сцены (Bartleson и Breneman, 1967 b) — по оси абсцисс (Hunt, 1969).

Как уже было сказано в гл. 6, среднее окружение — это типичное окружение отражающих отпечатков; тусклое окружение — типичное окружение телевизионного просмотра или просмотра листовых слайдов в просмотровых кабинах; темное окружение — окружение проекционного показа слайдов в затемненном помещении. В последних двух случаях величина гамма должна быть около 1.25 и 1.5 соответственно, поскольку тусклое и темное окружения понижают визуальную контрастность изображений. Внешнее освещение при телевизионном просмотре, как правило, изменчиво, но замечено, что когда дисплей телеприемника имеет гамма показа 1.5, то паразитная подсветка, исходящая от внешнего освещения обычного уровня, понижает гамма до 1.25, что и требуется (Novick, 1969) (см. раздел 19.13).

Напомним, что по мере роста гамма очень кстати растет и колориметрическая чистота элементов репродукции, поскольку высокая гамма усиливает разброс между их трехстимульными значениями (MacAdam, 1938); несмотря на то что темное или тусклое окружения слегка понижают эту чистоту, имеет место ее общий рост (см. раздел 7.9).

И снова забегая вперед, скажем, что с целью учета влияния на цветовое восприятие изменений в цветности освещения можно использовать т.н. *расчет смены хроматиче-*

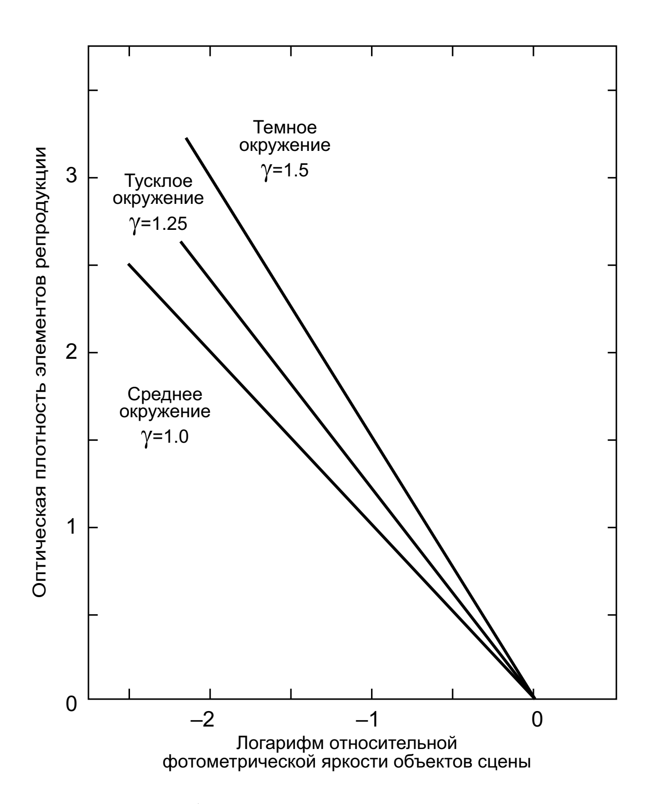


Рис. 11.6 Оптические плотности, необходимые для достижения уровня согласованного воспроизведения белых, серых и черных стимулов при трех вариантах окружения изображений: среднем (в основном отпечатки), тусклом (телепередача или листовые слайды в просмотровой кабине) и темном (проекционный показ слайдов в затемненном помещении).

ской адаптации (Chromatic Adaptation Transform — CAT), позволяющий вычислять трехстимульные значения т.н. *согласованных стимулов* (см. гл. 34).

⇨ *Согласованные цветовые стимулы* — это физически разные световые потоки, с разными трехстимульными значениями, которые при адаптации зрения по освещениям разной цветности, но равной интенсивности воспринимаются одинаково.

Расчет смены хроматической адаптации, в частности, учитывает тот факт, что цветность освещения далеко не всегда соответствует цветности белой точки, к примеру: когда в затемненном помещении с помощью проектора с лампой накаливания демонстрируются слайды, свет от экрана воспринимается слегка желтоватым, причем даже тогда, когда наблюдатель, казалось бы, адаптирован к нему. Следовательно, для создания ощущения белого нужный участок слайда должен быть слегка «синеватым» (Hunt, 1965b; Раздел 5.7). Однако напомним, что адаптация бывает полной по средне-серому и избыточной по темно-серому адаптирующим стимулам (Helson, 1938; Judd, 1940). Далее об этом см. в гл. 34, 35 и 36.

⇨ Концепция согласованного цветовоспроизведения, пожалуй, более всего подходит решению общих цветорепродукционных задач.

Отметим также, что уровень согласованного цветовоспроизведения настолько же выше уровня эквивалентного цветовоспроизведения, насколько уровень цветовоспро-

изведения колориметрического выше уровня точного цветовоспроизведения, поскольку, относя стимулы оригинала и репродукции к белому эталону, мы учитываем склонность зрения к неизолированному восприятию этих стимулов, то есть восприятию с опорой на некий зрительный эталон, задаваемый условиями просмотра.

Таким образом, когда, к примеру, изображение солнечной сцены воспроизводится на эквивалентном уровне, скажем, путем проекции слайда светом лампы накаливания в темном окружении, колориметрическая чистота эквивалентных стимулов должна быть очень высокой, дабы стимулы эти вызывали ощущения высокой полноты цвета объектов этой сцены. Однако мы знаем, что в затемненной обстановке проекционного показа полнота всех цветовых ощущений снижается и изображение выглядит менее естественным.

Численное описание отмеченных выше эффектов требует углубленного исследование, и нельзя забывать, что (как и в случае колориметрического воспроизведения) изображение будет тем более похожим на оригинал, чем ближе освещенность репродукции к освещенности оригинальной сцены. Таким образом, качество экранного изображения солнечной сцены можно повысить за счет повышения экранной яркости стимулов, полученных от слайда (Bartleson, 1965). Отпечатки солнечных сцен тоже смотрятся лучше при ярком свете.

Аналогичные эффекты возникают и в телевидении: с внедрением зеленых люминофоров на основе сульфида цинка (см. раздел 21.12) ощутимо снизилась колориметрическая чистота зеленого кардинального стимула, что привело к снижению качества колориметрического цветовоспроизведения. Однако, поскольку зеленый сульфидный люминофор позволяет воспроизводить изображения с большей абсолютной фотометрической яркостью — снижение колориметрической чистоты, если угодно, автоматически компенсируется. В итоге, общее качество телеизображений выросло (Matthews, 1963). Отметим, что в данном случае согласованное цветовоспроизведение уступает позиции воспроизведению эквивалентному.

11.9 ВЫДЕЛЕННОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

К рассуждениям об уровнях цветовоспроизведения, очевидно, необходимо добавить тот факт, что кожа европеоида на репродукции выглядит реалистичнее, когда передана как загорелая (MacAdam, 1951; Bartleson и Bray, 1962). Существует множество цветов, к которым применимы аналогичные поправки, к примеру, синие небо и водная гладь, радующие глаз на отпечатках или слайдах, в реальных сценах могут выглядеть почти серыми: дело в том, что фотопленки обладают некоторой чувствительностью к ультрафиолетовому излучению и, следовательно, повышают синеву неба и воды относительно чистоты цвета прочих элементов репродукции. Однако, когда такое повышение не чрезмерно, оно предпочтительно для большинства изображений неба и воды. Более того, и некоторые другие цветоискажения могут оказаться желательными при создании определенного настроения и атмосферы снимков.

Сказанное имеет очень большое прикладное значение, но вместе тем означает, что концепции спектрального, колориметрического, точного, эквивалентного и согласованного цветовоспроизведений — это базис, на котором строится разговор о намеренных цветовых искажениях в репродукции. То есть, мы говорим о т.н. *выделенном цветовоспроизведении*.

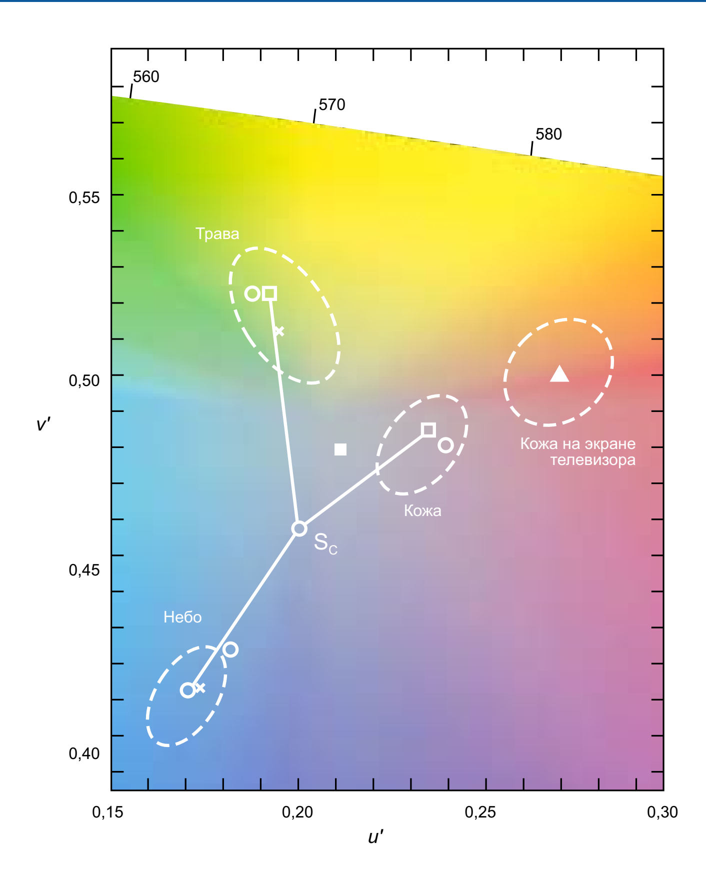


Рис. 11.7 □ — цветности репродукционных стимулов летней травы, ясного неба и типичной кожи европеоида, обеспечивающих уровень выделенного цветовоспроизведения при печати на отражение; ○ — цветности стимулов, полученных от фактических летней травы, синего неба и кожи европеоида; × — цветности репродукционных стимулов травы, ясного неба и типичной кожи европеоида, воспроизеденных обычной негативно-позитивной фотографической системой; во всех случаях — осветитель S_C.

Дополнительно:

▲ — цветность репродукционного стимула кожи европеоида, обеспечивающего уровень выделенного цветовоспроизведения телеэкраном (при тусклом просмотровом освещении лампами накаливания); ■ — субъективно нейтральная точка телеэкрана.

Пунктирные линии отграничивают области цветностей стимулов, дающих приемлемый результат цветовоспроизведения. Относительные фотометрические яркости выделенных стимулов: трава — 27%; небо — 30%; кожа — 39%. Типичные величины относительных яркостей реальных объектов: трава — 13%; кожа — 35%.

⇨ *Выделенное цветовоспроизведение* — это процесс воспроизведения цветовых стимулов, которые во имя достижения максимального комфорта их визуального восприятия отклоняются как от абсолютного, так и от относительного равенства по восприятию со стимулами оригинала.

На рис. 11.7 и 11.8 даны цветности стимулов репродукции ясного неба, летней травы и кожи европеоида, позволяющие достичь уровня выделенного цветовоспроизведения (Hunt, Pitt и Winter, 1974). Приведенные данные получены из снимков уличных сцен, а необходимый эффект достигнут путем применения пары непрозрачных масок: одной затемнявшей интересующий участок изображений, другой — оставшуюся их часть.

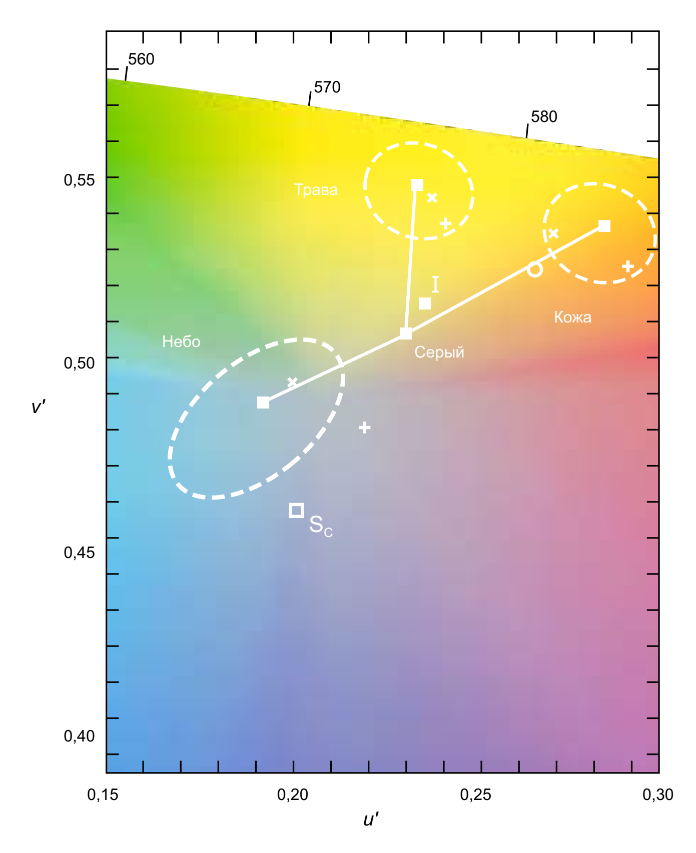


Рис. 11.8 ■ — цветности репродукционных стимулов летней травы, ясного неба и типичной кожи европеоида, обеспечивающих уровень выделенного цветовоспроизведения при проекционном показе слайдов; × — цветности репродукционных стимулов травы, ясного неба и типичной кожи европеоида, воспроизеденных обычными обращаемыми фотопленками (слайд-пленками) двух типов; I — цветность открытого проекционного света, отраженного от экрана (коррелированная цветовая температура 3400 К); «Серый» — субъективно нейтральная точка с коррелированной цветовой температурой 3700 К; ○ — цветность стимула, полученного от кожи европеоида, освещенной светом проектора.

Пунктирные линии ограничивают области цветностей стимулов, дающих приемлемый результат цветовоспроизведения.

Фотометрические яркости выделенных стимулов, взятые относительно яркости открытого проекционого света, отраженного от экрана: трава — 6%; небо — 16%; кожа — 34%.

Выполнив разные экспозиции при съемке и при увеличении, экспериментаторы получили серии отпечатков по каждой сцене с разными оттенками неба, травы и кожи, но при неизменном хроматическом балансе оставшейся части изображения; то же самое было проделано со слайдами.

Репродукционные стимулы неба, травы и кожи менялись при увеличении (или проекции на экран) за счет укрытия соответствующих областей изображения равномерно окрашенными цветными фильтрами. Для управления яркостями тестовой области и оставшейся части изображений использовались нейтральные фильтры.

Каждый отпечаток и каждая проекция слайда, полученные таким путем, оценивались группой наблюдателей по параметру качества цветопередачи неба, травы и кожи. После чего для получения результатов, показанных на рис. 11.7 и 11.8, по каждому из интересующих репродукционных стимулов исследователи фиксировали их цветности и

фотометрические яркости, которые затем были ставились в соответствие наблюдательским визуальным оценкам.

Визуальная оценка отпечатков производилась при типичном комнатном освещении, а их колориметрия рассчитывалась по стандартному C-осветителю CIE. Колориметрия слайдов вычислялась по фактической лампе слайд-проектора. Плюс к тому было проведено аналогичное исследование (Novick, 1972) выделенного воспроизведения стимула цвета человеческой кожи экраном типичного телеприемника (рис. 11.7 — пунктирные линии ограничивают область цветностей стимулов, дающих приемлемое качество цветовоспроизведения). К сравнению на том же рис. даны цветности отраженных стимулов, воспроизведенных заурядной негативно-позитивной фотографической системой (×), а на рис. 11.8 — цветности стимулов, воспроизведенных двумя разными слайд-пленками (+ и ×).

По рис. 11.7 видно, что цветность выделенных репродукционных стимулов кожи (□), воспроизводимых отпечатками, как и следовало ожидать, лежит на желтой («загорелой») стороне области цветностей типичной усредненной кожи европеоида (○) (Thomas, 1973), однако отличие от оригинала при этом весьма незначительно.

Выделенная цветность травы (□) также лежит на желтой стороне области цветностей типичной летней травы (○) (Thomas, 1973), но вновь отличие от оригинала невелико.

Итак, мы видим, что цветности реальных кожи и травы лежат внутри области приемлемого цветовоспроизведения, то есть в отношении данных стимулов колориметрическое и выделенное цветовоспроизведение в целом сходны (хотя относительные яркости оригинальной травы и ее изображения разнятся). Однако в отношении неба, несмотря на то что доминирующие длины волн выделенного (□) и реального (○) стимулов очень близки (Hendley и Hecht, 1949), выделенный стимул обладает очевидно большей колориметрической чистотой, чем стимул оригинальный.

В телевидении доминирующая длина волны выделенного цветового стимула кожи (▲) аналогична доминирующей длине волны реального стимула при C-осветителе (○), но при этом его колориметрическая чистота ощутимо выше. Частично это объясняется тем, что связанная с ним субъективно нейтральная точка (■) смещена в сторону желтого, а возможно, отчасти и тем, что под воздействием тусклого просмотрового окружения имеет место эффект визуальной десатурации.

Выделенные стимулы проекционного показа (рис. 11.8) относительно выделенных стимулов отпечатков сдвинуты в оранжевом направлении — так получилось из-за адаптации зрения к свету проектора (3400 K): точка, отмеченная как «Серый», — это результат восприятия наблюдателями, адаптированными к условиям просмотра проекционного показа, и, соответственно, она смещена в оранжевую сторону от точки серого при дневном свете (S_C). Точка, обозначенная «I», представляет цветность света проектора, и то, что она не совпадает с точкой «Серый», свидетельствует о неполноте адаптации к этому свету.

На рис. 11.9 объединены данные рис. 11.7 и 11.8: сдвиг цветностей всех стимулов в оранжевую сторону при проекционном показе — очевиден. Любопытно, что существует некая малая область репродукционных стимулов, цветности которых таковы, что при просмотре отпечатков наблюдатели относят свои ощущения к цвету травы, а при проекционном показе с лампой накаливания — к цвету неба. Если бы цветности реальных стимулов (рис. 11.7) можно было конвертировать в цветности согласованных стимулов по тем условиям просмотра, в которых были получены данные рис. 11.8, то можно было бы ответить на вопрос, привело ли выделенное цветовоспроизведение при проекционном показе к субъективным цветоискажениям или нет.

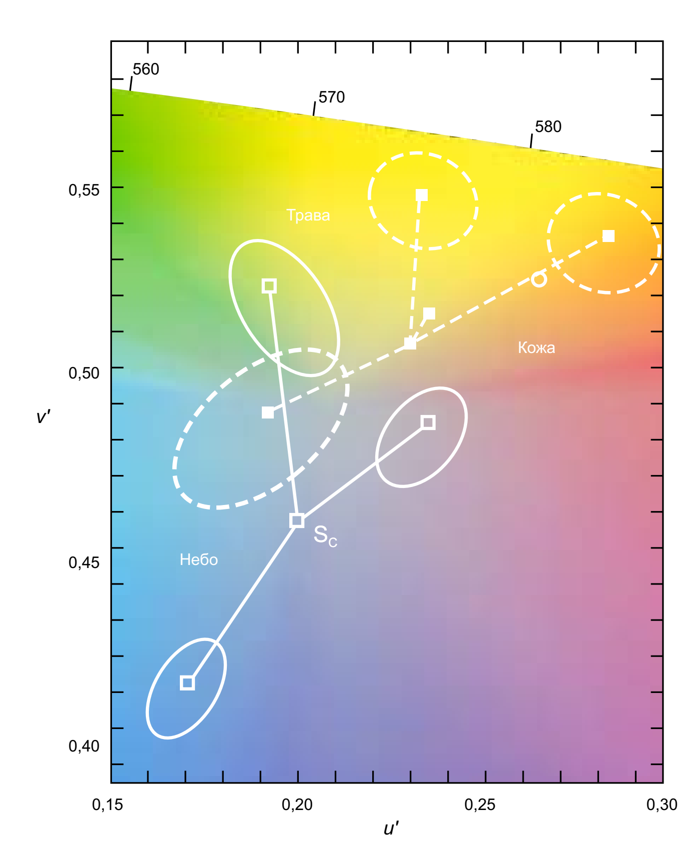


Рис. 11.9 Основные данные рис. 11.7 (сплошные линии) и 11.8 (пунктирные линии), показанные одновременно.

В сравнении с реальными стимулами, репродукционные стимулы цвета кожи при проекционном показе (○) обладают явно большей колориметрической чистотой (что компенсируется, вероятно, эффектом десатурации, вызванном, в свою очередь, темным окружением изображения). Мы видим, что за единственным исключением результаты по обеим пленкам находятся внутри области визуального допуска.

Сравнение данных, представленных на рис. 11.7 и 11.8, с результатами ранее проводившихся исследований (MacAdam, 1951; MacAdam, 1954; Bartleson, 1959; Bartleson и Bray, 1962) показывает, что на последние мог оказать влияние в целом более низкий уровень колориметрической чистоты репродукционных стимулов, воспроизводившихся устаревшими системами. Следовательно, результаты выделенного цветовоспроизведения зависят как от возможностей самоей цветорепродукционной системы, так и от характера условий просмотра, а также от культурных, этнических и физиологических особенностей наблюдателей. Таким образом, данные, продемонстрированные на рис. 11.7 и 11.8, могут служить лишь примерами результатов выделенного цветовоспроизведения, но не определять тактику в тех или иных областях его применения. Было показано также, что такой критерий оценки, как *естественность изображения* — это важное слагаемое качества репродукций (Yendrikhovskij, Blommaert и de Ridder, 1999).

Стоит отметить, что некоторые популярные системы работают на более высоких значениях контрастов (см. разделы 6.4 и 6.5), чем того требует согласованное цветовоспроизведение. Причины тому следующие: когда оригиналом является сцена, освещенная естественным дневным светом, репродукция обычно имеет много меньший

уровень интегральной фотометрической яркости, что ведет к некоторому снижению визуального контраста. Низкий уровень общей яркости изображения приводит также к снижению субъективной яркости и полноты цвета его элементов, и принудительное повышение контрастности репродукции может приблизить восприятие изображения к восприятию оригинала.

Очевидно, что т.н. *памятные цвета* имеют тенденцию к большей чистоте, чем цветовые ощущения, вызванные оригинальными стимулами, и что повышение контрастности изображения может повысить чистоту цвета репродукционных стимулов.

Наконец, эффект атмосферной дымки в изображениях проявляет себя сильнее, нежели в реальной сцене.

⇨ Выделенное цветовоспроизведение — это прерогатива и цель портретного фотоискусства и художественной фотографии в целом.

11.10 ВЫВОДЫ

Спектральное цветовоспроизведение — то есть достижение равенства спектральных коэффициентов отражения/пропускания элементов репродукции спектральным коэффициентам отражения/пропускания объектов сцены, или же, достижение равенства относительных спектральных распределений энергий стимулов, создаваемых оригиналом и репродукцией — это удел цветопробных и контратипных систем.
Несмотря на то что спектральное цветовоспроизведение неприменимо к большинству иных ситуаций, оно крайне важно при торговле через рекламные каталоги.

Колориметрическое цветовоспроизведение — то есть достижение равенства цветностей и относительных фотометрических яркостей элементов репродукции цветностям и относительным фотометрическим яркостям объектов сцены — используется тогда, когда оригинал и его изображение рассматриваются в одинаковых условиях и с использованием осветителей одной цветности, но возможно различных интенсивностей.
Используется при фотокопировании.

Точное цветовоспроизведение — то есть достижение равенства цветностей, относительных и абсолютных фотометрических яркостей элементов репродукции цветностям, относительным и абсолютным фотометрическим яркостям объектов сцены — гарантирует равенство по восприятию оригинала и репродукции в одинаковых условиях просмотра.
Применяется в цветопробных процессах и в абстрактных цветовоспроизводящих системах.

Эквивалентное цветовоспроизведение, при котором цветности, относительные и абсолютные фотометрические яркости объектов сцены и элементов репродукции таковы, что между ними достигается равенство по визуальному восприятию — позволяет учитывать все эффекты просмотровых условий.
Применяется для передачи изображений по сети интернет.

Согласованное цветовоспроизведение, при котором цветности, относительные фотометрические яркости объектов сцены и элементов ее репродукции таковы, что между ними достигается равенство по визуальному восприятию, когда уровни освещенностей и/или интегральных фотометрических яркостей оригинала и репро-

дукции одинаковы — позволяет учесть все эффекты просмотровых условий за исключением абсолютных уровней интегральной яркости оригинала и репродукции. Достижение уровня согласованного цветовоспроизведения — цель работы большинства цветорепродукционных систем.

Выделенное цветовоспроизведение, которое отклоняется от равенства по восприятию (как при одинаковых, так и при разных уровнях абсолютной интегральной фотометрической яркости оригинала и репродукции), но при этом позволяет добиваться визуально комфортных результатов в отношении изображений объектов, цвет которых хорошо известен.
Применяется в художественной фотографии и дизайне.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Allnat, J.W., Proc. Inst. Elec. Eng., 112, 1819 (1965).
Allnat, J.W., Proc. Inst. Elec. Eng., 113, 531 (1966).
Allnat, J.W., Proc. Inst. Elec. Eng., 115, 371 (1968).
Bartleson, C.J., Phot. Sci. Eng., 3, 114 (1959).
Bartleson, C.J., Phot. Sci. Eng., 9, 174 (1965).
Bartleson, C.J., J. Phot. Sci., 30, 33 (1981).
Bartleson, C.J., and Bray, C.P., Phot. Sci. Eng., 6, 19 (1962).
Bartleson, C.J., and Breneman, E.J., J. Opt. Soc. Amer., 57, 953 (1967a).
Bartleson, C.J., and Breneman, E.J., Phot. Sci. Eng., 11, 254 (1967b).
Breneman, E.J., J. Opt. Soc. Amer., 67, 657 (1977).
Burnham, R.W., Evans, R.M., and Newhall, S., J. Opt. Soc. Amer., 47, 35 (1957).
Clapper, F.R., and DeMarsh, L.E., Private communication (1969).
Corbett, J.M., Proc. Inst. Elec. Eng., 117, 512 (1970).
Evans, R.M., J. Opt. Soc. Amer., 33, 579 (1943).
Evans, R.M., J. Opt. Soc. Amer., 49, 1049 (1959).
Helson, H., J. Exp. Psychol., 23, 439 (1938).
Hendley, C.D., and Hecht, S., J. Opt. Soc. Amer., 39, 870 (1949).
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 40, 362 (1950). See Figs. 3 and 4.
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 42, 190 (1952).
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 43, 479 (1953).
Hunt, R.W.G., The Reproduction of Colour, 1st Edn., Fountain Press, p. 196 (1957).
Hunt, R.W.G., J. Phot. Sci., 13, 108 (1965a).
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 55, 1540 (1965b).
Hunt, R.W.G., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 268 (1969).
Hunt, R.W.G., J. Phot. Sci., 18, 205 (1970).
Hunt, R.W.G., Colour 73, Proc. 2nd. A.I.C. Congress, York, pp. 62–3, Hilger, London (1973).
Hunt, R.W.G., Measuring Colour, 3rd Edn., Fountain Press, Kingston-upon-Thames, England (1998).
Hunt, R.W.G., Pitt, I.T., and Ward, P.C., J. Phot. Sci., 17, 198 (1969).
Hunt, R.W.G., Pitt, I.T., and Winter, L.M., J. Phot. Sci., 22, 144 (1974).
Judd, D.B., J. Opt. Soc. Amer., 30, 2 (1940).
MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 28, 399 (1938).
MacAdam, D.L., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 56, 502 (1951).
MacAdam, D.L., Proc. I.R.E., 42, 166 (1954).
Matthews, J.A., Private communication (1963).

Nayatani, Y., Takahama, K., and Sobagaki, H., Color Res. Appl., 6, 161 (1981).

Novick, S.B., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 342 (1969).

Novick, S.B., Brit. Kinematog. Sound Tel., 54, 130 (1972).

Pinney, J.E., and DeMarsh, L.E., J. Phot. Sci., 11, 249 (1963).

Pitt, I.T., In Colour Measurement in Industry, p. 234, The Colour Group (Great Britain) (1967).

Pitt, I.T., and Winter, L.M., J. Opt. Soc. Amer., 64, 1328 (1974).

Rowe, S.C.H., Ph.D. Thesis, The City University (1972).

Thomas, W., S.P.S.E. Handbook of Photographic Science and Engineering, pp. 441–2, Wiley, New York (1973).

Yendrikhovskij, S.N., Blommaert, F.J.J., and de Ridder, H., Color Res. Appl., 24, 52 (1999).

Часть вторая

ЦВЕТНАЯ ФОТОГРАФИЯ

12 СУБТРАКТИВНАЯ ЦВЕТНАЯ ФОТОГРАФИЯ

12.1 ВВЕДЕНИЕ

Основа субтрактивной цветной фотографии — процесс образования трех изображений из голубого (cyan), пурпурного (magenta) и желтого (yellow) красителей. Для того чтобы красители эти могли создавать именно *изображения*, их концентрации должны меняться по полю кадра сообразно распределению световых потоков в сцене. Добиться сего можно несколькими способами, но наиболее популярный из них — это т.н. *цветное проявление*, разговор о котором разумнее всего начать с описания *метода рельефных изображений* (в прошлом весьма популярного в профессиональном кинематографе и чуть менее в профессиональной фотографии).

12.2 РЕЛЬЕФНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Суть метода рельефных изображений такова: толщина желатинового слоя экспонированного фотоматериала меняется от точки к точке в зависимости от уровня экспозиции. При погружении пленки в красящий раствор, на тех участках материала, где слой желатина толще, осядет большее количество красителя — результатом чего явится т.н. *красочное изображение*.

Способ получения желатиновых рельефных изображений (рис. 12.1) с черно-белых негативов (экспонированных при съемке через красный, зеленый и синий фильтры) на т.н. *гидротипной пленке* относится к категории *гидротипных процессов.*

Гидротипная пленка, на которой образуется, разумеется, позитивное красочное изображение, представляет собой подложку, политую обычной черно-белой эмульсией. Особенность этой эмульсии состоит в том, что она не задублена, не сенсибилизирована по спектру (т.е. чувствительна только к коротковолновому —«синему» —компоненту света) и содержит желтый краситель.

В копировальном аппарате (или при фотоувеличении) эмульсия экспонируется через подложку, но желтый краситель при этом поглощает «синий» компонент (к которому как раз и чувствителен фотоматериал). Та часть эмульсии, что лежит ближе всего к подложке, активируется легко, поскольку свет заполняет ее, преодолевая лишь сверхтонкий слой желтого красителя. По мере удаления от подложки экспонирование идет все с большим и большим трудом, поскольку свету приходится пробиваться сквозь сравнительно толстый слой красителя. Таким образом, непосредственно возле подложки эмульсия экспонируются сильнее, а по мере удаления от нее — слабее. Следовательно, когда разные участки пленки экспонированы по-разному, образовавшееся скрытое изображение будет варьировать по глубине залегания согласно интенсивности экспозиции.

Сильно экспонированные участки (левый край схемы рис. 12.1) образуют скрытое изображение, заполняющее собой практически всю толщину эмульсионного слоя, а менее экспонированные — лишь малую часть его толщины, залегая непосредственно

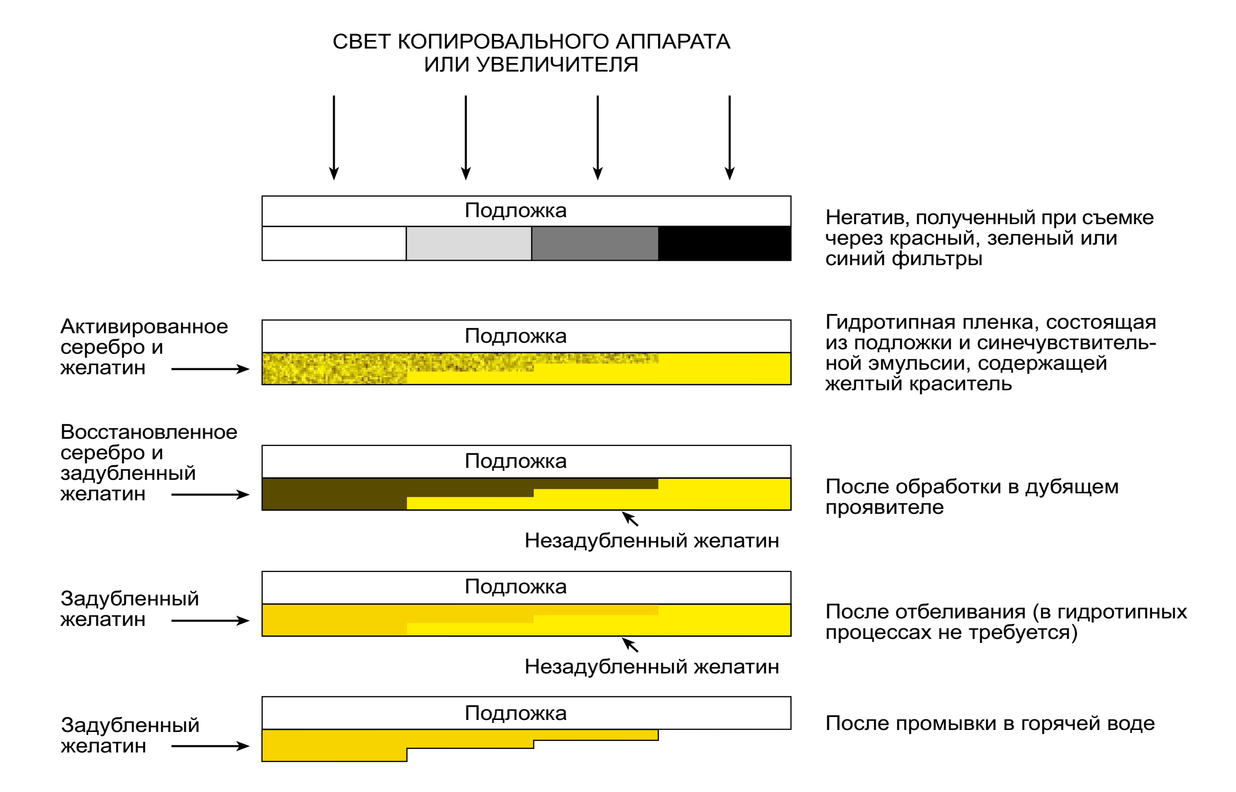
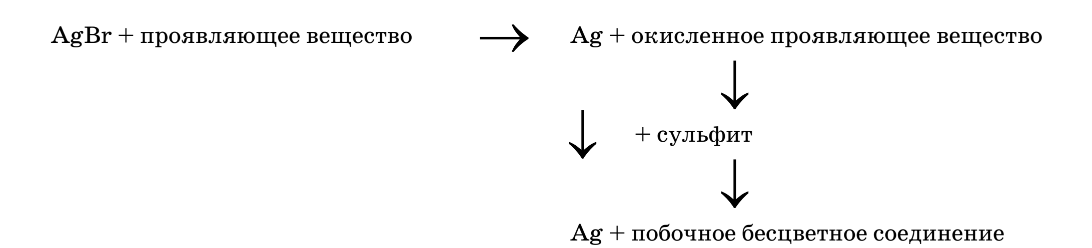


Рис. 12.1 Формирование желатинового рельефного изображения с черно-белого негатива.

возле подложки. Результирующая картина, таким образом, будет представлять собой *рельефное изображение*.

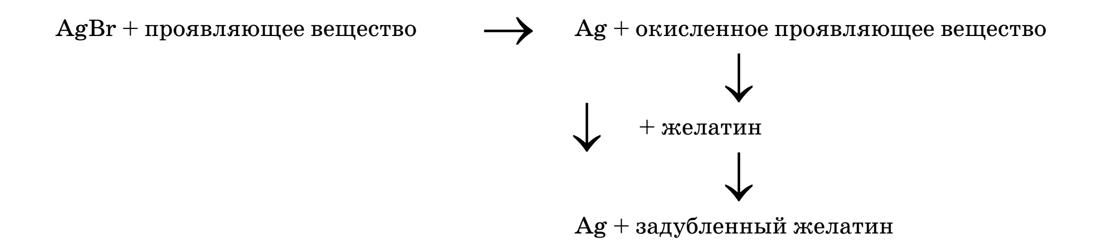
На следующем этапе обработки из экспонированной пленки необходимо удалить весь незадействованный желатин, дабы выделить скрытое изображение и получить в итоге изображение рельефное. Желатин растворим в горячей воде, но с помощью специальной химической обработки его можно укрепить (задубить), вследствие чего станет нерастворимым. Следовательно, если мы каким-то образом сможем задубить тот желатин, что содержит активированное светом галоидное серебро, а оставшуюся часть оставить незадубленной, то за счет промывки фотоматериала в горячей воде мы удалим лишний желатин и получим рельефное желатиновое изображение, закрепленное на подложке.

Способ реализации описанной идеи на удивление прост: мы знаем, что наряду со вспомогательными компонентами фотографические проявители содержат проявляющее вещество и сульфит, и что реакция проявляющего вещества с экспонированным кристаллом бромистого серебра выглядит так:



Проявляющее вещество восстанавливает активированное светом бромистое серебро до серебра металлического, в результате чего само проявляющее вещество окисляется, превращаясь в оксид, который, в свою очередь, немедленно реагирует с сульфитом, образуя бесцветное побочное соединение.

Чтобы задубить желатин на скрытом изображении (и только на нем) в качестве проявителя используется производное пирогаллола и значительно меньшее количество сульфита. Первая часть реакции протекает аналогично описанной, но окисленное производное пирогаллола почти не расходует сульфит и реагирует в основном с желатином, задубливая его. Таким образом:



Следовательно, гидротипная пленка обрабатывается «пиро»-проявителем при сверхмалом количестве сульфита с последующей промывкой в горячей воде для получения собственно рельефного изображения из задубленного желатина.

На следующем этапе обработки рельефное изображение прокрашивается, и коль скоро величина абсорбированного красителя пропорциональна толщине желатина, количество красителя в каждой точке изображения будет представлять собой функцию от величины экспозиции при съемке (что и требуется).

Если одно из трех рельефных желатиновых изображений прокрасить голубым, второе — пурпурным и третье — желтым красителями, то после отбеливающей ванны, удаляющей из слоев серебро, простым наложением трех красочных изображений друг на друга мы воспроизведем субтрактивный цветной позитив.

При получении цветного позитивного *отпечатка* красители переносят с рельефного желатинового изображения на специальным образом подготовленную бумажную поверхность (рис. 12.2).

Чтобы получить диапозитив или кинокопию красители переносят на специально подготовленную прозрачную основу (*Technicolor process*).

По завершении любого гидротипного процесса рельефное желатиновое изображение можно вновь прокрасить, а красочное изображение перенести на следующий экземпляр подложки. Проделав таковое с тремя красками, получают еще один экземпляр цветного позитива. Отметим, что процесс можно повторять почти бесконечно и тиражировать огромное количество копий.

Кстати говоря, коль скоро при гидротипных процессах краситель всегда уходит с рельефного желатинового изображения на другой носитель, в удалении восстановленного серебра из гидротипной пленки нет необходимости.

12.3 ЦВЕТНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ

Метод *цветного проявления* красочных изображений функционально проще, чем метод рельефных изображений, поскольку избавляет процесс от двухстадийности: т.е. проявления и последующего прокрашивания. Цветное проявление весьма схоже с

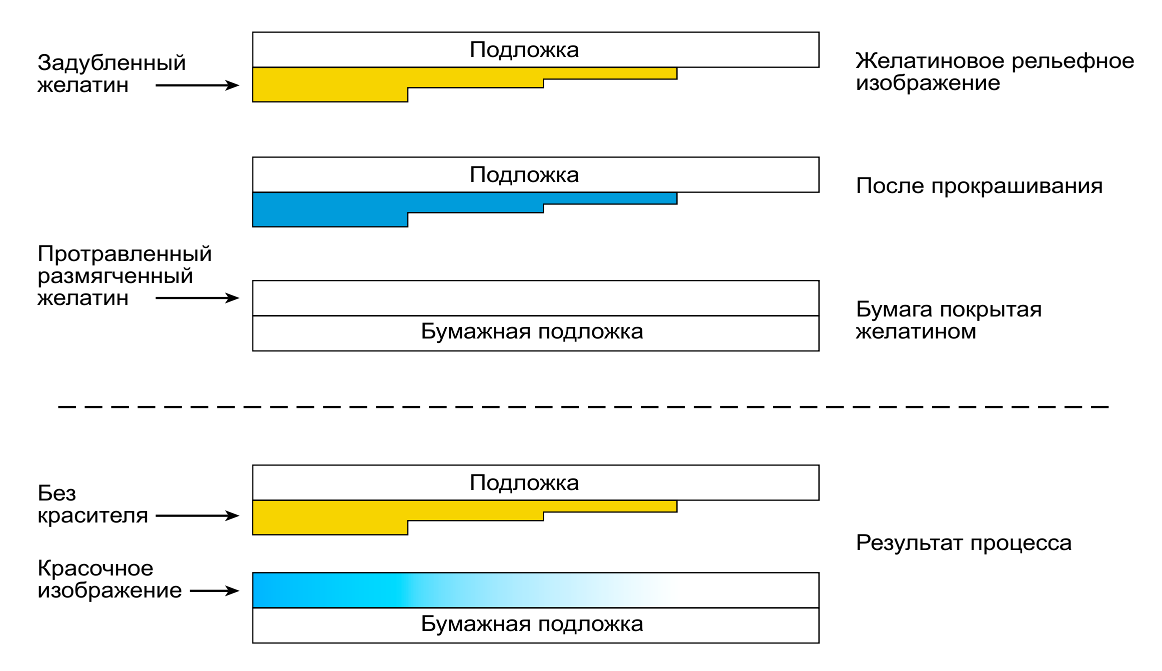
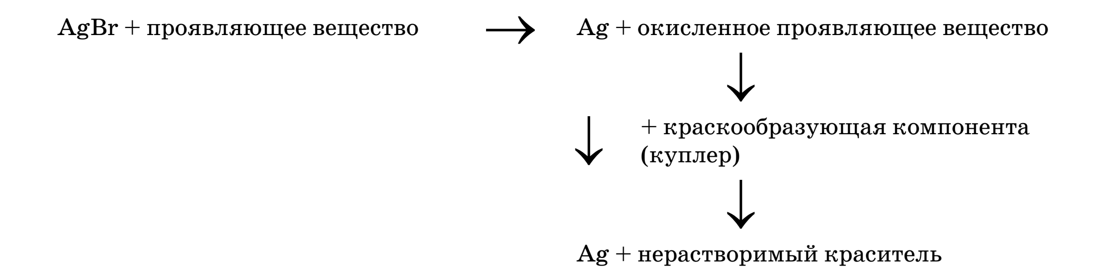


Рис. 12.2 Перенос красочного изображения с желатинового рельефного изображения на бумагу.

техникой дубящей проявки, но вместо оксида проявляющего вещества, реагирующего с эмульсионным желатином, в проявитель (либо в эмульсию) вводят некие связующие агенты — т.н. *куплеры* (краскообразующие компоненты), которые реагируют с оксидом цветного проявляющего вещества, образуя при этом нерастворимые окрашенные соединения (красители):



Данная реакция успешно протекает только в присутствии цветных проявляющих веществ определенной химической структуры, к примеру парафенилендиамина и некоторых его производных. Понятно, что краситель в этом случае будет представлять собой продукт взаимодействия краскообразующей компоненты с оксидом проявляющего вещества, а спектральные характеристики этого красителя будут зависеть от химической структуры обеих составляющих (хотя сами по себе и та и другая, как правило, бесцветны).

Количественный выход красителя зависит от концентрации в растворе активного оксида проявляющего вещества, которая, в свою очередь, пропорциональна количеству восстановленного серебра. Таким образом, выход красителя в каждой точке кадра непосредственно зависит от уровня экспозиции этой точки, и, следовательно, выпадая, краситель формирует именно *изображение*, а не равномерно окрашенный слой.

Реакция сочетания оксида проявляющего вещества с краскообразующей компонентой (куплером) локализуется вокруг активированных светом кристаллов галоидного серебра, поэтому при цветном проявлении т.н. *«облака» красителя* будут образовываться только вокруг кристаллов серебра, восстановленного проявляющим веществом. Следовательно, при цветном проявлении красочное изображение получается несколько размытым в сравнении с изображением серебряным, из которого оно было получено.

Если в результате цветного проявления нами будут получены три красочных изображения на базе голубого, пурпурного и желтого красителей, то путем т.н. *отбеливания серебра* и последующей суперпозиции изображений мы воспроизведем субтрактивный цветной фотоснимок. Альтернативно: красочные изображения можно перенести на другую подложку, но процесс цветного проявления не может дать большого числа копий подобно методу рельефных изображений. Однако серьезным преимуществом техники цветного проявления является то, что она дает возможность получать красочные изображения различных спектральных свойств в разных слоях одной и той же пленки.

Далее о цветном проявлении мы будем говорить в 17-й главе.

12.4 ТРЕХСЛОЙНЫЕ ФОТОМАТЕРИАЛЫ

Очевидно, что возможности любого цветофотографического процесса, построенного на трех красочных изображениях, получаемых последовательно, ограничены регистрацией статичных или очень медленно движущихся объектов. Отметим, что в мозаичном и лентикулярном аддитивном процессах сепарированные изображения формируются *одновременно* на трех соседних участках фотоматериала, а в современных субтрактивных цветофотографических процессах красочные изображения образуются в трех эмульсионных слоях, лежащих один над другим (рис. 12.3). Таким образом, мы начинаем разговор о т.н. *трехслойных цветных фотоматериалах*.

Мы знаем, что изначально фотоэмульсии чувствительны лишь к свету коротковолновой части спектра (синечувствительны). Расширение их чувствительности до

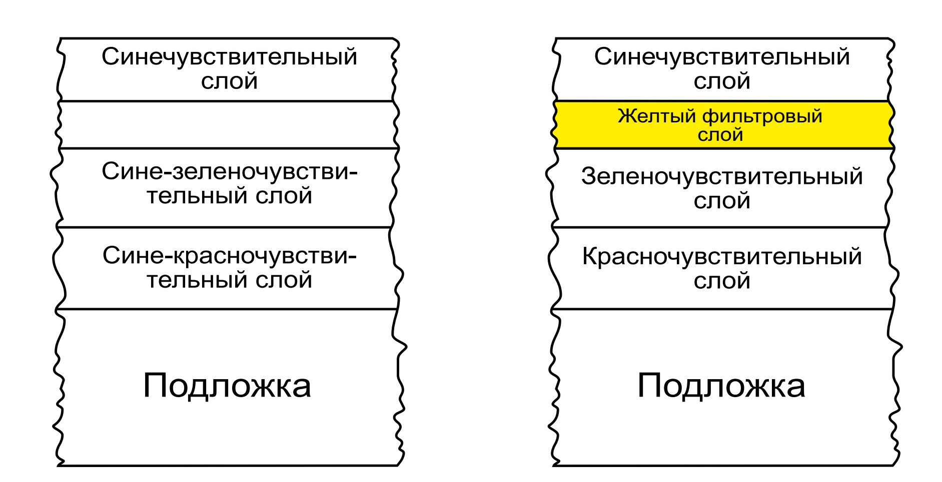


Рис. 12.3 Варианты сенсибилизации слоев типичных треслойных фотопленок.

средне- и длинноволновых участков достижимо только путем добавки т.н. *сенсибилизирующих красителей*.

Обычная, то есть несенсибилизированная эмульсия, как правило, лежит в верхнем слое и образует негатив, зарегистрировавший коротковолновые компоненты световых потоков, исходящих от объектов сцены. Понятно, что в этом случае никакого синего фильтра не требуется, поскольку эмульсия сама по себе «отвечает» только на «синий» компонент света.

Нижний эмульсионный слой фотопленки селективно сенсибилизирован к длинноволновому («красному») свету. Разумеется, красночувствительный слой сохраняет свою естественную чувствительность к свету синей части спектра, но последняя никак себя не проявляет, поскольку сразу за верхним эмульсионным слоем располагается желтый фильтровый слой. Таким образом, изображение, образованное в эмульсионном слое, фиксирует длинноволновые компоненты стимулов сцены. Мы видим, что и специальный (красный) фильтр не требуется, поскольку желтый фильтр в совокупности с длинноволновой сенсибилизацией образует исключительно красночувствительный слой.

Между желтым фильтровым и нижним красночувствительным слоями фотопленки расположена эмульсия, сенсибилизированная к свету только средних длин волн: эмульсия эта совместно с желтым фильтровым слоем образует слой, чувствительный исключительно к зеленому свету, что позволяет регистрировать средневолновый компонент стимулов сцены без использования специального зеленого фильтра.

Понятно, что трехслойная пленка фиксирует сепарированные изображения одномоментно: первое за красным «фильтром», второе — за зеленым, третье — за синим. Все, что остается в этом случае, — это обработать фотоматериал описанным выше путем и получить соответственно голубое, пурпурное и желтое красочные изображения.

Ниже речь пойдет о методах обработки трехслойных фотоматериалов. Отметим, что к этому вопросу существует два принципиальных подхода: при первом проявляющее вещество сочетается со специальной краскообразующей компонентой, внедренной в слои фотоматериала; при втором — краскообразующая компонента и проявляющее вещество взаимодействуют друг с другом в растворе.

12.5 ОБРАБОТКА ФОТОМАТЕРИАЛОВ С ВНЕДРЕННЫМИ КРАСКООБРАЗУЮЩИМИ КОМПОНЕНТАМИ

На рис. 12.4 представлена общая схема обработки трехслойного фотоматериала с внедренными краскообразующими компонентами: на каждом из четырех больших кругов показаны сильно увеличенные разрезы эмульсионных и фильтрового слоев. Треугольники символизируют кристаллы галоидного серебра (зерно): треугольники с точками — экспонированные кристаллы галоидного серебра, содержащие скрытое изображение; треугольники без точек — кристаллы неэкспонированные и, соответственно, без скрытого изображения.

В нашем примере (рис. 12.4 [а]) свет оказал воздействие на правый участок пленки, не тронув левый. По тем кругам, на которых показаны частички краскообразующих компонент, мы видим, что верхний (синечувствительный) слой способен образовывать желтый (yellow) краситель, нижний (красночувствительный) слой — голубой (cyan) краситель, средний (зеленочувствительный) — пурпурный (magenta) краситель.

Паразитной диффузии куплеров из собственных слоев можно противостоять, прикрепив к ним некие высокомолекулярные цепи (впервые предложены Agfa в 1936 г.

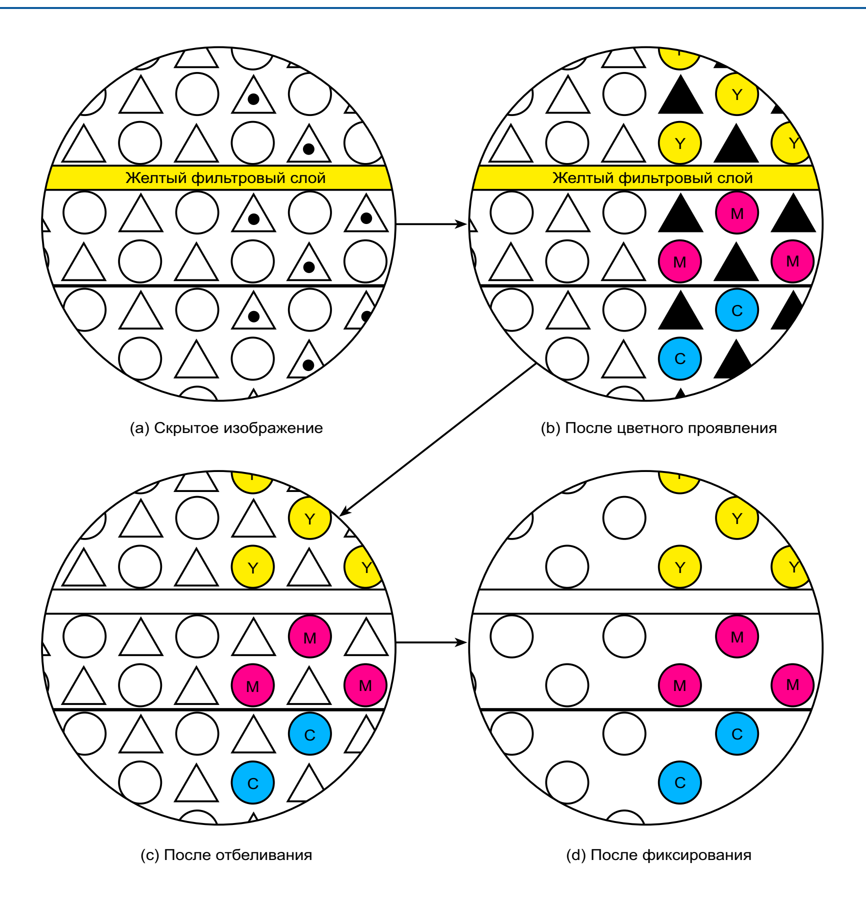


Рис. 12.4 Схематичное представление сильно увеличенного разреза обработанного по негативному процессу трехслойного фотоматериала с внедренными в него краскообразующими компонентами (куплерами): △— неэкспонированные кристаллы галоидного серебра; ◬ — экспонированные (активированные) кристаллы галоидного серебра; ▲ — восстановленное серебро; ○— частицы краскообразующих компонент; Y — частицы желтого (yellow) красителя; M — частицы пурпурного (magenta) красителя; C — частицы голубого (cyan) красителя.

[Koshofer, 1966]), либо растворяя краскообразующие компоненты в маслах с последующим диспергированием полученных растворов до микрокапель, размер которых составляет примерно 1/10 размера зерен галоидного серебра (впервые применено в материалах Kodak [Mees, 1942]).

12.5.1 Последовательность действий

12.5.1.1 Цветное проявление

При погружении фотоматериала в раствор, содержащий должное количество проявляющего вещества, ситуация развивается по сценарию, показанному на рис. 12.4 (b): проявляющее вещество восстанавливает активированное светом галоидное серебро до серебра металлического (черные треугольники), вокруг зерен которого начинается реакция сочетания оксида проявляющего вещества с краскообразующей компонентой. В результате реакции сочетания в верхнем слое фотоматериала образуется желтый краситель (Y), в нижнем слое — голубой краситель (C), и в среднем — пурпурный краситель (M). Вокруг каждого проявленного зерна красители располагаются в виде сверхмелких молекулярных либо глобулярных облаков.

12.5.1.2 Отбеливание и фиксирование

Дабы проявленная пленка не выглядела темной, необходимо вывести из нее неэкспонированное галоидное серебро, что в черно-белом процессе достигают путем *фиксирования* фотоматериала в т.н. «гипо»-растворе (растворе гипосульфита [тиосульфата] натрия. — *Прим. пер.*); однако в цветном процессе необходимо удалить еще и самое серебряное изображение, которое наряду с галогенидом серебра будет затемнять изображение красочное. От серебряного изображения удобнее всего избавляться, окисляя восстановленное серебро в т.н. *отбеливающей ванне*, предваряющей фиксирование. Таким образом, обработка фотоматериала после цветного проявления состоит в окислении серебра (восстановленного в процессе проявления) назад, к ионам серебра (рис. 12.4 [c]), и последующем удалении (происходящем в растворе фиксажа) всех серебряных ионов из эмульсионных слоев (рис. 12.4 [d]).[1]

Отметим, что на стадии отбеливания обесцвечивается и желтый фильтровый слой.

Поскольку незадействованные краскообразующие компоненты «по умолчанию» совершенно бесцветны (см. разделы 15.4 и 17.4), то нет ничего страшного в том, что они остаются в слоях фотопленки; более того, в негативных цветных фотопленках неиспользованные куплеры *оптически активны* (т.е. окрашены в желтый или розовый цвета), что служит оптимизации окончательного результата.

В результате всех описанных выше процедур в экспонированном участке пленки (правый на рис. 12.4) образуются все три красителя: голубой, пурпурный и желтый, и этот участок становится почти черным, а в неэкспонированном участке (левом) красители не образуются вовсе (светлая область).

12.5.2 Негатив как инвертированный позитив

Итак, мы получили *цветной негатив*: экспозиция привела к почернению, отсутствие экспозиции оставило фотоматериал светлым. То есть, элементы изображения при рассматривании фотопленки на просвет инвертированы — световые потоки от красных объектов сцены инициировали выход голубого красителя; от зеленых — пурпурного; от синих — желтого и наоборот (по оппонентному принципу).

Поясним инверсию следующим примером: когда пленка экспонируется только красным светом — «реагирует» лишь нижний светочувствительный слой, что ведет к выходу только голубого красителя. Наоборот: когда пленка экспонируется только голубым светом (сине-зеленым), то «реагируют» синечувствительный и зеленочувствительный слои, что ведет к выходу желтого и пурпурного красителей, но вследствие исходной суперпозиции слоев в трехслойных материалах при просмотре последних на белом свету результирующий стимул оказывается красным.

Чтобы получить позитивное изображение необходимо выполнить перефотографирование (то есть — *печать*) обработанного негатива на аналогичный негативный фотоматериал — пленку или фотобумагу: при этом вновь произойдет инверсия, но по отношению к сцене — все элементы изображения окажутся позитивными, т.е. верными (рис. 12.8) (подробнее см. раздел 12.8).

По описанному принципу работают системы *Kodacolor, Eastman Color, Agfacolor, Ektacolor, Vericolor, Ferraniacolor* и *Fujicolor*.

---

[1] В некоторых процессах отбеливающая и фиксирующая ванны объединены в общем растворе (т.н. blix-раствор).

12.6 ОБРАБОТКА ОБРАЩАЕМЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ФОТОМАТЕРИАЛОВ С ВНЕДРЕННЫМИ КРАСКООБРАЗУЮЩИМИ КОМПОНЕНТАМИ

Когда в негативном этапе репродукционного процесса нет необходимости, то, как и в черно-белой фотографии, с целью непосредственного получения позитивного изображения, экспонированную пленку можно подвергнуть т.н. *обращению*.

12.6.1 Последовательность действий

Общая схема процесса обращения показана на рис. 12.5 (символы те же, что и на рис. 12.4): свет также экспонирует только правый участок пленки, и, соответственно, скрытое изображение (рис. 12.5 [a]) формируется только на нем.

12.6.1.1 Черно-белое проявление

Обработка фотоматериала начинается с того, что экспонированная пленка погружается в раствор обычного черно-белого проявителя, восстанавливающего активированное бромистое серебро до металлического серебра с одновременным образованием оксида черно-белого проявляющего вещества. Однако оксид черно-белого проявляющего вещества не реагирует с краскообразующими компонентами, и поэтому на данной стадии процесса красители не образуются (рис. 12.5 [b]).

12.6.1.2 Обращение

На следующем этапе обработки выполняется т.н. *реэкспонирование* фотопленки с помощью равномерного интенсивно-белого света или же (намного чаще) при помощи специального химического вуалирующего вещества (т.н. *обращающая ванна*) с образованием скрытого изображения в оставшемся (т.е. непроявленном) галоидном серебре (рис. 12.5 [c]).

12.6.1.3 Цветное проявление

После обращающей ванны пленку помещают в раствор цветного проявителя, восстанавливающего активированное при засветке (химическом вуалировании) бромистое серебро до серебра металлического с одновременным образованием оксида цветного проявляющего вещества. Последний в непосредственной близости от кристаллов восстановленного серебра реагирует с краскообразующими компонентами, образуя голубой, пурпурный и желтый красители, т.е. соответственно голубое, пурпурное и желтое красочные изображения (рис. 12.5 [d]).

12.6.1.4 Отбеливание и фиксирование

Последующие отбеливание (рис. 12.5 [e]) и фиксирование (рис. 12.5 [f]) удаляют из слоев фотоматериала все серебро, в результате чего левая (неэкспонированная) часть фотопленки во всех трех слоях оказывается заполненной только красителями (темная), а правая — экспонированная оказывается свободной от них (прозрачная). На выходе имеем позитив, который и требовался.

12.6.2 Пример

Сказанное выше проиллюстрируем примером.

Если правую часть пленки экспонировать только красным светом, то:

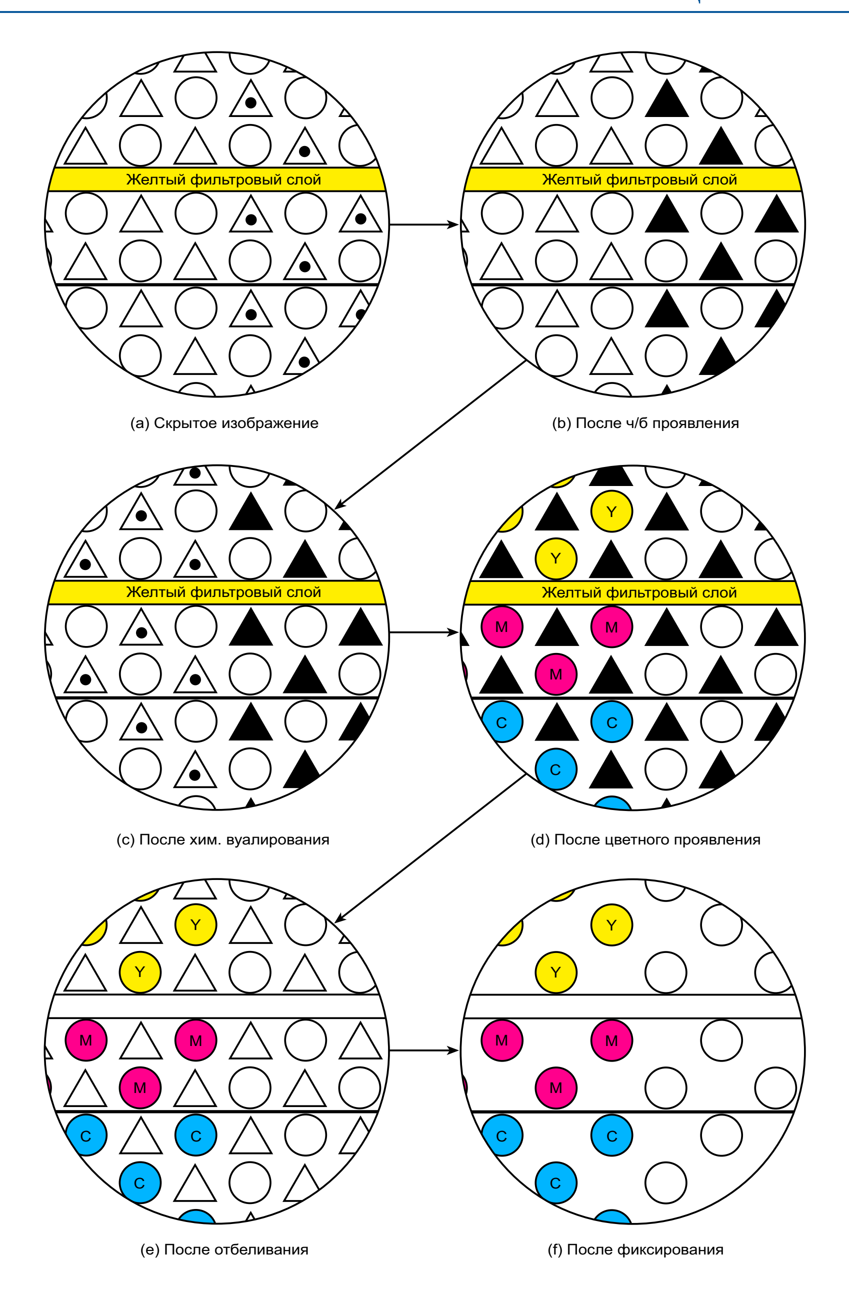


Рис. 12.5 Этапы обработки цветной обращаемой фотопленки с внедренными краскообразующими компонентами.

— активируется лишь красночувствительный, нижний, слой фотоматериала;

— черно-белый проявитель восстанавливает серебро только в активированном слое;

— химическое вуалирование (обращающая ванна) или засветка активируют оставшееся непроявленное галоидное серебро, образуя тем самым скрытое изображение только в двух верхних светочувствительных слоях (но не в нижнем);

— при цветном проявлении образуются соответственно только желтый и пурпурный красители;

— при рассматривании пленки на просвет в белом свете результирующий стимул — красный.

По описанному принципу действовали и действуют следующие системы: *Ektachrome, Elitechrome, Agfachrome, Fujichrome, Perutzcolor, Orwochrom, Ferraniacolor, Anscochrome* и *Gevachrome*.

12.7 ОБРАБОТКА ЦВЕТНЫХ ФОТОМАТЕРИАЛОВ, НЕ СОДЕРЖАЩИХ КРАСКООБРАЗУЮЩИХ КОМПОНЕНТ

На рис. 12.6 дана общая схема получения позитивного цветного изображения путем цветного проявления, при котором три краскообразующие компоненты и общее цветное проявляющее вещество находятся в трех отдельных проявляющих растворах (символы рис. 12.6 те же, что и у рис. 12.4 и 12.5, и по-прежнему мы предполагаем, что свет экспонировал только правую часть фотопленки).

12.7.1 Последовательность действий

12.7.1.1 Черно-белое проявление

На первом этапе обработки обычный черно-белый проявитель в экспонированном участке пленки (рис. 12.6 [a]) образует серебряные изображения (рис. 12.6 [b]).

12.7.1.2 «Красная» засветка и «голубое» проявление

За черно-белым проявлением следует реэкспонирование пленки со стороны подложки равномерным красным светом (рис. 12.6 [c]). Поскольку к красному свету чувствителен только нижний слой, скрытое изображение появляется лишь в этом слое, и при погружении пленки в проявляющий раствор с cyan-образующей компонентой голубой краситель образуется, соответственно, только в левой (неэкспонированной при съемке) части нижнего слоя фотопленки (рис. 12.6 [d]).

12.7.1.3 «Синяя» засветка и «желтое» проявление

Засветка равномерным синим светом со стороны эмульсии. Поскольку желтый фильтровый слой защищает два нижележащих слоя от воздействия синего света, на данной стадии процесса скрытое изображение появляется только в верхнем слое (рис. 12.6 [e]), и при погружении пленки в цветной проявитель, содержащий yellow-образующую компоненту, желтый краситель образуется только в левой части верхнего слоя фотопленки (рис. 12.6 [f]).

12.7.1.4 Вуалирующее «пурпурное» проявление

Очевидно, что теперь остается прокрасить средний слой фотоматериала пурпурным красителем в левой (неэкспонированной при съемке) части фотопленки, для чего используется проявитель, содержащий magenta-образующую компоненту. Особенность этого проявителя состоит еще и в том, что он является *вуалирующим*, т.е. восстанавливает серебро даже из неэкспонированного галоидного серебра (рис. 12.6 [g]).

12.7.1.5 Отбеливание и фиксирование

Завершающие стадии процесса традиционны: отбеливание (рис. 12.6 [h]) и фиксирование (рис. 12.6 [g]).

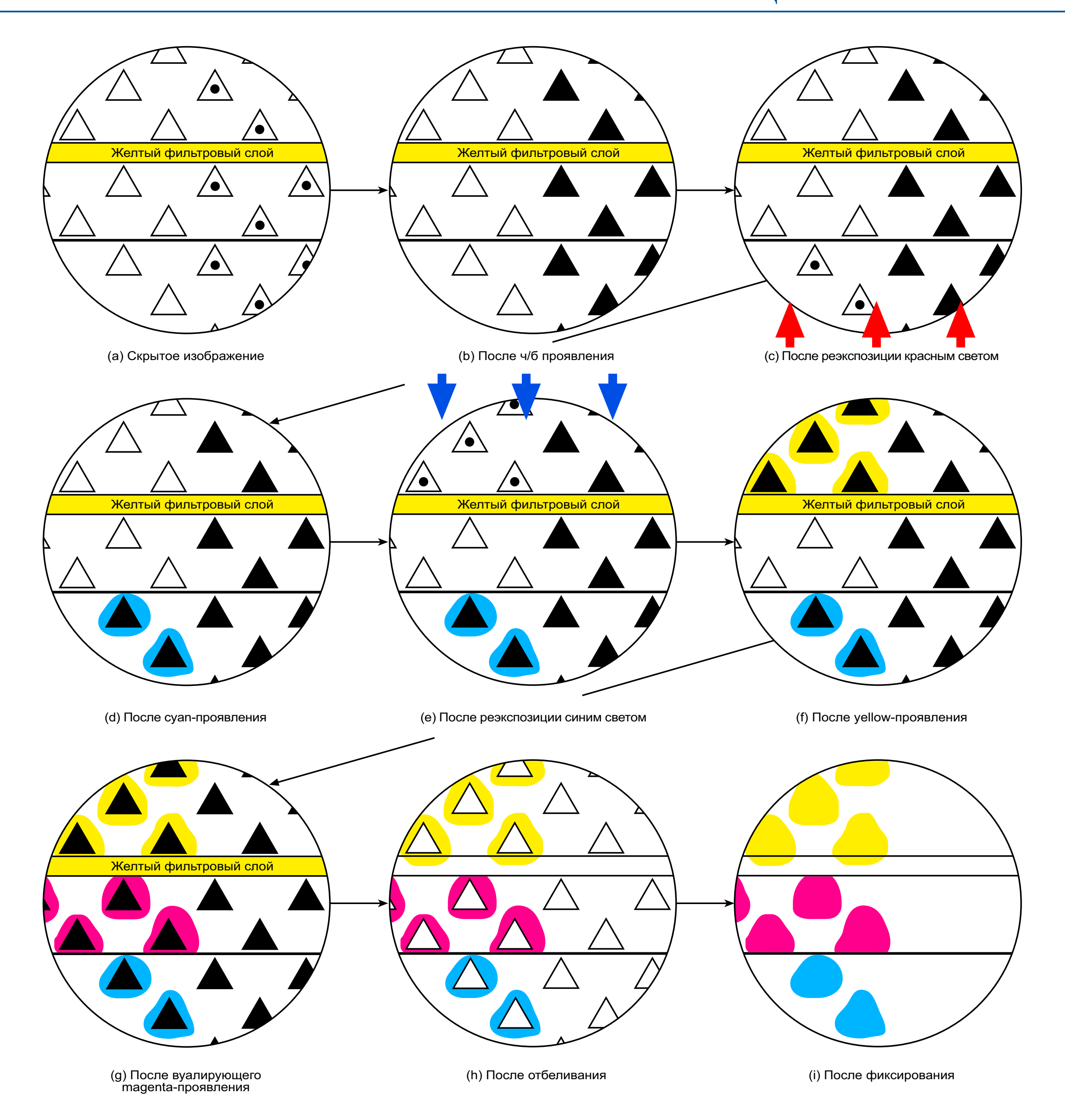


Рис. 12.6 Этапы обработки цветной обращаемой фотопленки, не содержащей краскообразующих компонент.

12.7.2 Область применения

Итак, мы видим, что результирующее расположение красителей такое же, как и на рис. 12.5, то есть описанная выше обработка привела к появлению позитивного изображения. Доказательство того, что полученное изображение обеспечивает точную тонально-хроматическую передачу зарегистрированной сцены, будет аналогичным приведенному в предыдущих разделах.

Отметим, что данный способ цветного проявления не очень подходит получению цветных негативов, поскольку в процессе задействованы две обращающих засветки (позволяющие цветным проявителям независимо друг от друга воздействовать на каждый из слоев).

Как видно из рис. 12.6, процесс весьма сложен, и поэтому осуществим только в заводских условиях. Однако у него есть и положительная сторона: благодаря тому что фотоматериал не содержит краскообразующих компонент, светочувствительные слои можно полить очень тонкими, что позволяет добиться невероятно высокой разрешающей способности фотоматериала (см. рис. 18.9). Кстати, именно поэтому система описанного типа успешно использовалась в 8-мм любительском кино, где размер кадрового окна равен примерно 4.9×3.7 мм. Отметим, что для 35-мм фотографии разрешающей способности данных фотоматериалов более чем достаточно.

Фотопленки, ориентированные на обработку комбинированными проявителями (т.е. фотоматериалы, не содержащие краскообразующих компонент), — это *Kodachrome* (появилась в 1935 г.), *Kodachrome II* (1961 г.), *Kodachrome X* (1963 г.), *Ilfochrome* (1948 г., см. Hornsby, 1950), *Kodachrome 25*, *Kodachrome 40* (Тип «А»), *Kodachrome 64* (1974 г.) и *Kodachrome 200* (1986 г.).

Стоит сказать, что оригинальный Kodachrome-процесс, изобретенный двумя музыкантами — Леопольдом Маннесом (Leopold Mannes) и Леопольдом Годовским (Leopold Godowsky) (Davies, 1936; Matthews, 1955; Photographic Journal, 1985) — слегка отличался от описанного и задействовал несколько отдельных отбеливающих ванн (Weissberger, 1970); схема, показанная на рис. 12.6, был внедрена в 1938 г.

Наконец, отметим, что теоретически вполне возможно организовать три светочувствительных эмульсии в виде смеси и полить на подложку одним слоем, но попытки внедрить такую схему в производство встретили в свое время ряд серьезных трудностей (Hanson, 1977; Ryan, 1977).

12.8 ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЦВЕТНОГО НЕГАТИВА

Согласно формальному определению:

⇨ *Цветной негатив* — это три монохромных негативных изображения сцены, зафиксированные соответственно через красный, зеленый и синий фильтры и отличные друг от друга настолько, что каждое из них можно выделить в самостоятельное изображение этой сцены.

Таким образом, в контексте цветной фотографии, три черно-белых серебряных изображения представляют ценность только тогда, когда они физически отделены друг от друга и разнесены в пространстве (что, кстати говоря, в свое время активно использовалось в кинематографе) (Capstaff, 1950). Однако если эти изображения прокрашены по-разному, то необходимости в их пространственной разделенности нет: если одно изображение прокрашено cyan-, второе magenta-, а третье — yellow-красителями, то при рассматривании негатива в красном свете видимым окажется только cyan-изображение; в зеленом свете — только magenta-изображение; в синем — только yellow.

Желательно (но не обязательно), чтобы при регистрации длинноволновых («красных») компонентов стимулов сцены на пленке формировалось cyan-изображение, средневолновых («зеленых») компонентов — magenta-избражение и коротковолновых («синих») — yellow-изображение.

В цветном негативе наряду с инверсией тонов (черный выглядит на негативе белым, белый — черным) инвертируются и вся хроматика: эквивалентом красного становится сине-зеленый, сине-зеленого — красный, зеленого — пурпурный, пурпурного — зеленый, синего — желтый и желтого — синий. Иными словами, на негативе, рассматриваемом в белом свете, каждый зафиксированный стимул сцены приобретает

оппонентный цветовой тон. Однако важно не то, насколько цветное негативное изображение непохоже на оригинал, а то, насколько эффективно три совмещенных негативных красочных изображения могут быть разделены на этапе печати.

На основании сказанного выше приходим к выводу, что запечатываемый позитивный материал должен давать «красно-поглощающее» (cyan-) изображение при экспозиции красным светом, поскольку именно красный свет выделяет из цветного негатива то изображение, что было получено при съемке за счет «голубых» компонентов стимулов сцены. Аналогично запечатываемый материал должен при экспонировании зеленым светом давать magenta-изображение, а при экспонировании синим светом — yellow-изображение. Полученный таким образом отпечаток в отношении негатива будет инвертным не только тонально, но и хроматически, то есть воспроизведет на поверхности достоверную копию сцены, зафиксированной при съемке (Ashton, 1980).

Однако теоретически возможен и такой вариант: изображение, зарегистрированное «красным» компонентом стимулов сцены, после проявления представлено magenta, а изображение, зарегистрированное «зеленым» компонентом стимулов сцены, — cyan. Запечатываемый материал в этом случае должен быть устроен так, что на зеленый свет, выделяющий из негатива magenta-изображение, он «отвечает» выходом краснопоглощающего cyan-красителя, а на красный свет, выделяющий из негатива cyan-изображение, — выходом зеленопоглощающего magenta-красителя.

Стоит сказать также, что световые потоки, используемые при печати негативов, не обязаны быть строго красным, зеленым и синим: порой весьма успешно применяются инфракрасный, зеленый и ультрафиолетовый лучи. Обязательным требованием является то, чтобы свет, формирующий на отпечатке краснопоглощающее cyan-изображение, выделял из негатива то изображение, что было образовано за счет регистрации «красного» компонента стимулов сцены при съемке. Аналогично для зеленого и синего.

Отметим, что характер красителей, задействованных в негативе, и спектральный состав экспонирующего света при печати — это только вопрос удобства, и совсем некритично то, чтобы печать с негативов осуществлялась раздельными красным, зеленым и синим потоками: коль скоро фотобумага чувствительна к свету только в требуемых спектральных зонах, можно пользоваться обычным белым светом. (На практике, однако, с целью повышения колориметрической чистоты элементов отпечатков часто используют свет, состоящий из узких спектральных полос, строго совпадающих с пиками поглощения красителей негатива, что позволяет эффективнее сепарировать негативные изображения и уменьшать их «взаимозагрязненность»).

12.9 ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ СУБТРАКТИВНАЯ ФОТОГРАФИЯ

В любительской цветной фотографии широко распространены как обращаемые, так и негативно-позитивные фотоматериалы.

Цветные слайды, которые получают непосредственно из отснятой фотопленки путем ее обращения, дают изображения высочайшего качества при очень низкой себестоимости (что делает их особо популярными). Однако недостатком диапозитивов, во-первых, является то, что для просмотра они требуют специального оборудования (и, по возможности, затемненного помещения), а во-вторых, то что вне цифровой технологии со слайдов трудно получить отражающие отпечатки (или фильмокопии) без ощутимой потери качества изображения.

По описанной причине наряду со слайд-системами широкое распространение получили т.н. *негативно-позитивные системы*, позволяющие, во-первых, воспроизводить

с одного негатива столько идентичных отпечатков (или диапозитивов), сколько требуется, а во-вторых, корректировать как тоновые, так и цветовые погрешности: то есть, мы говорим, что негативно-позитивная система обладает исключительной фотографической широтой и гибкостью в плане компенсации вариаций цветности освещения.

Однако наряду с преимуществами у негативно-позитивных систем есть и недостатки:

— во-первых, высокая (в сравнении со слайдами) себестоимость отпечатков, поскольку в процесс вовлечены как негативные, так и позитивные фотоматериалы, а также высокая себестоимость самой печати (когда с одного негатива требуется получить серию отпечатков, себестоимость падает, но большинству любителей, как правило, с одного кадра нужен лишь один отпечаток);

— во-вторых, качество диапозитивов, получаемых негативно-позитивным способом, обычно ниже, чем качество слайдов, сделанных на обращаемой пленке (но при этом оно может оказаться выше, чем при копировании с обращаемых оригиналов).

Следовательно, выбор любителем подходящей системы теоретически зависит от того:

— что важнее — слайд или отпечаток;

— сколько нужно копий — одна или больше;

— что дешевле.

На практике же большинство любителей используют обе системы, что называется, по номиналу: для слайдов берут цветную обращаемую пленку, для отпечатков — негативную.

История любительских цветных слайдов началась в 1936 г., когда на рынке появилась цветная обращаемая 35-мм фотопленка *Kodachrome*. История цветного негативно-позитивного процесса также началась в 30-е годы прошлого века: первыми на рынке появились мозаичные аддитивные системы (Harrison и Spencer, 1937) и трехслойные субтрактивные фотобумаги (Berger, 1950; Koshofer, 1966). Однако цветная негативная пленка *Kodacolor* поступила в распоряжение любителей только в начале следующего десятилетия, в 1942 г. (Mees, 1942).

Первое время неэкспонированные участки пленки Kodacolor были прозрачными, то есть такими же, как и у черно-белых негативов, но в 1944 г. с целью улучшения цветопередачи стали применять серебряную маску (Evans, Hanson и Brewer, 1953), из-за которой негативы стали внешне выглядеть серыми (см. раздел 15.2). В 1949 г. от серебряной маски отказались, заменив ее на оптически активные (окрашенные) краскообразующие компоненты (см. раздел 15.4), благодаря чему неэкспонированные участки негативов стали оранжевыми. В 1955 г. цвет маски слегка изменили, сбалансировав пленку по дневному свету и свету вспышек одновременно: пленка обладала повышенной фотографической широтой, поскольку могла работать с освещением обоих типов без сужения коридора допустимых погрешностей экспозиции. Впоследствии колбы вспышек начали покрывать подсиненным лаком (благодаря чему цветность испускаемого ими света приблизилась к цветности дневного света), а затем de facto стандартом в любительской фотографии стали ксеноновые лампы-вспышки, свет которых совсем близок к дневному.

В 1963 г. появилась пленка Kodak *Instamatic* с чувствительностью 64 ASA, а в 1972 г., в рамках программы *Pocket Instamatic,* — более резкая, менее зернистая, с менее интенсивной оранжевой маской пленка *Kodacolor II*.

Негативные фотоматериалы Kodacolor радикально более высокого качества поступили в продажу лишь спустя 10 лет — в 1982 г. и поначалу представляли собой фор-

матные фотопластины, но уже в 1983 г. появилась линейка 35 мм пленок *Kodacolor VR* с чувствительностями 100, 200, 400 и 1000 ASA. К 1986 г. эти пленки были усовершенствованы, в результате чего на рынок поступила линейка *Kodacolor Gold*, а спустя еще два года, в 1988 г., — линейка *Ektar*.

12.10 ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ СУБТРАКТИВНАЯ ФОТОГРАФИЯ

Многое из сказанного о любительской цветной фотографии относится и к фотографии профессиональной, но в целом последней важнее качество, нежели цена. Из этих соображений в профессиональной фотографии с целью достижения наивысшей резкости и удобства ретуши и по сей день активно используются форматные слайды.

Фотографы-профессионалы очень часто сами занимаются проявкой, и, следовательно, им необходимы пленки с краскообразующими компонентами, внедренными в светочувствительные слои (такие, к примеру, как пленки линейки Ektachrome, появившейся 1946 г.).

Отметим, что до недавнего времени в профессиональной цветной фотографии активно использовались и гидротипные системы (см. раздел 12.2), поскольку, несмотря на очень высокую стоимость процесса, они обладают возможностью раздельного управления тремя красочными изображениями.

Профессиональные фотографы порой работают на очень длинных или очень коротких выдержках, для чего выпускаются специальные пленки, рассчитанные на специфические диапазоны экспозиций, например, одна пленка может быть ориентирована на экспозиции от 1/10 с и короче, другая — на диапазон от 1/10 с до 1 мин (поскольку невозможно изготовить пленку, в которой величины гамма светочувствительных слоев оставались бы одинаковыми на всех возможных выдержках).

Одним из специфических направлений профессиональной фотографии является аэрофотосъемка, для которой изготавливаются специализированные пленки. В одной из таких пленок слои сенсибилизированы нетрадиционно, а именно: к зеленой, красной и инфракрасной частям спектра. Такая пленка дает соответственно yellow-, magenta- и cyan-красочные изображения (Tarkington и Sorem, 1963). Когда на аэрофотопленке фиксируется растительность (окраска которой определяется концентрацией хлорофилла в клетках), то после обработки с обращением трава и листва выглядят красными или пурпурными, поскольку наряду с отражением в зеленой части видимого спектра хлорофилл активно отдает электромагнитную энергию еще и в инфракрасной области. Антропогенные объекты, выкрашенные в зеленый, не обладают таким свойством и поэтому на слайде выглядят синими. Следовательно, данная пленка (разработанная еще в 1942 г. специально для целей авиаразведки) очень четко «отличает» растительность от камуфлированных под нее поверхностей. С неменьшим успехом аэрофотопленки применяются в лесотехнических целях, позволяя различать деревья разных пород (Smith, 1968; Spencer, 1947), а также в целях выявления подводных объектов (Mott, 1966).

У аэрофотопленок, лишенных синечувствительного слоя, слой, образующий magenta-изображение, можно нанести сверху, что позволяет увеличить резкость (см. раздел 12.11). Впрочем, таковое возможно и при наличии синечувствительного слоя, но с условием, что чувствительность последнего к коротким волнам спектра будет много больше чувствительности остальных слоев. В этом случае желтый фильтровый слой можно нанести поверх всех светочувствительных слоев, но при этом он должен пропускать столько синего света, чтобы последнего хватало для экспонирования синечув-

ствительного слоя, но было бы недостаточно для экспозиции прочих слоев фотопленки (Fritz, 1971; Moser и Fritz, 1975).

12.11 СУБТРАКТИВНАЯ КИНЕМАТОГРАФИЯ

В любительском цветном кино (где размер изображений был еще меньше, чем даже на любительских цветных фотопленках) применялись исключительно цветные обращаемые кинопленки, в частности: в период с 1935 по 1965 г пленки Kodachrome (формат 8- и 16-мм), а с 1965 г. — Kodachrome формата Super 8.[1] Различные варианты Ektachrome появились позже. Однако сегодня большинство кинолюбителей пользуются т.н. *электронными цифровыми камкордерами* (видеокамерами), привлекающими к себе низкой себестоимостью фильмов и простотой управления (см. раздел 20.14).

В профессиональном кинематографе съемка ведется как на негативные, так и на обращаемые материалы (см. рис. 12.7 и 12.8), однако, поскольку в профессиональном кино обычно требуется большое число копий, использование обращаемых пленок не очень практично.

Теперь пройдем по схеме рис. 12.7.

Простейшая негативно-позитивная система, подобная показанной на рис. 12.7 (а), может состоять, к примеру, из связки двух пленок: *Eastman Color Negative* и *Eastman Color Print* (или, в прошлом, из связки *Eastman Color Negative* с гидротипным позитивным процессом *Technicolor*).

В пленке *Eastman Color Print* вместо традиционной последовательности слоев, показанной на рис. 12.3, использована последовательность, при которой слой, формирующий magenta-изображение, лежит вверху, а yellow-слой — внизу, возле подложки. Поскольку каждый эмульсионный слой этого фотоматериала пропускает свет лишь частично, верхний слой оказывается наиболее резким, а нижний — наименее. Следовательно, для получения изображения максимальной резкости желательно располагать magenta-слой (дающий наиболее заметное изображение) наверху, а желтый слой, изображение которого менее всего заметно, — внизу (см. раздел 18.16). Таковое осуществимо на основе хлоро-серебряных или хлоро-бромо-серебряных эмульсий, исходная чувствительность которых лежит не в синей, а в ультрафиолетовой области спектра. Эти эмульсии не настолько светочувствительны, чтобы использоваться при съемке, но в связке с высокочувствительным «синим» слоем вполне подходящи для копирования фильмов.

Несмотря на то что (благодаря высокому качеству и низкой цене) система, показанная на рис. 12.7 (а), используется в подавляющем большинстве случаев, есть ряд мотивов, по которым в репродукционный процесс вводят дополнительные технологические этапы.

Мотивы эти таковы:

— во-первых, спецэффекты, в частности, такие, как т.н. *наплыв* (одной сцены на другую) и *вытеснение* (одной сцены другой), и если не существует иного, более легкого пути (например, электронного), то ввод дополнительных этапов неизбежен;

— во-вторых, необходимость изготовления промежуточных копий, которые ис-

---

[1] 30 июня 2006 г. компания Kodak объявила о закрытии линейки любительских 8- и 16-мм пленок Kodachrome и демонтаже оборудования их обработки в США и Швейцарии. — *Прим. пер.*

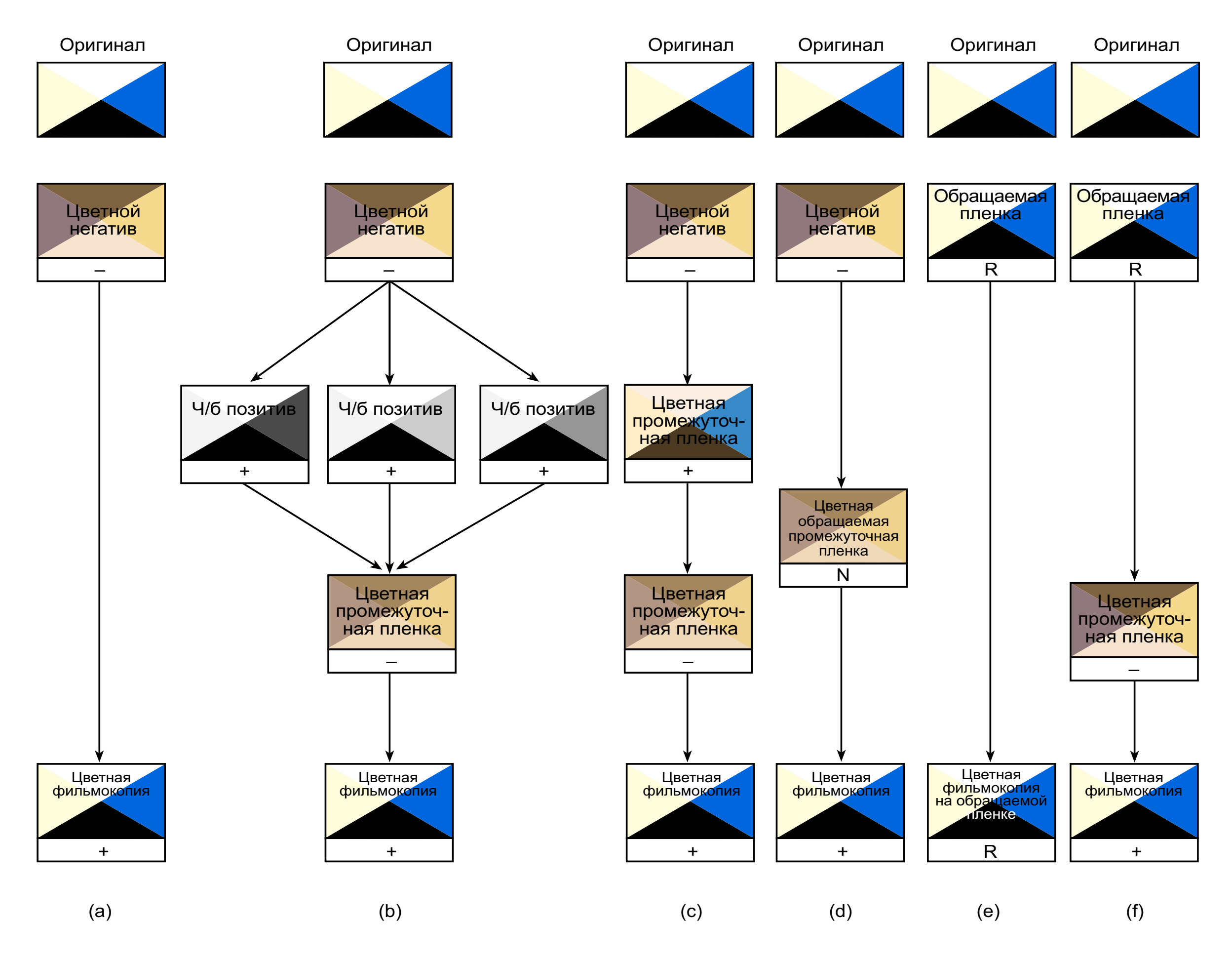


Рис. 12.7 Различные способы получения цветных позитивных фильмокопий в профессиональном кинематографе. Характер изображения на пленке:

—	Негативное
+	Позитивное, отпечатанное с негатива
R	Позитивное, полученное процессом обращения
N	Негативное, полученное процессом обращения

пользуются с целью дополнительной страховки от потери или порчи отснятого материала при его распространении и тем более экспорте;

— в-третьих, промежуточные копии помогают согласовать форматы съемочных и прокатных киноматериалов;

— в-четвертых, более низкая себестоимость фильмокопий, выполненных с промежуточной копии, а не с оригинала (в тех случаях, когда съемка велась на обращаемую пленку).

На рис. 12.7 (b) показана система, в которой цветной негатив дуплицируется путем печати через красный, зеленый и синий фильтры на соответствующие черно-белые пленки, что обеспечивает лучшую сохраняемость, чем в случае цветного изображения. Черно-белые пленки задействуются единожды — при печати с них на специальную несенсибилизированную красителями *негативную дубль-пленку* (синечувстви-





Рис. 12.8 Результаты фильмокопирования на пленку Eastman Color Print (правая колонка), выполненного с соответствующих негативов (левая колонка): (a) — Eastman Color Negative; (b) — промежуточный негатив на обращаемой промежуточной пленке Eastman Color Reversal Intermediate; (c) — промежуточный позитив Eastman Color Intermediate, полученный с оригинала; (d) — промежуточный негатив на Eastman Color Intermediate, полученный с промежуточного позитива (см. раздел 12.11).
Оранжевый оттенок изображений левой колонки вызван наличием оптически активных краскообразующих компонент (см. раздел. 15.4).





тельный слой которой дает magenta-изображение, зеленочувствительный — cyan-изображение, а красночувствительный — yellow-изображение). Критичное в плане резкости magenta-изображение у этой пленки находится в верхнем слое, а менее всего значимое в плане резкости yellow-изображение — в нижнем.

Однако негативные дубль-пленки в свое время были заменены т.н. *промежуточными пленками* (*Eastman Color Intermediate*) со стандартным расположением слоев (в которые с целью повышения оптического разрешения были добавлены специальные поглощающие красители).

Если в процессе производства пленки *Eastman Color Intermediate* строго удерживается единичная гамма тонопередачи, то осуществим гораздо более легкий способ фильмокопирования (рис. 12.7 [c]), позволяющий уйти от необходимости трудоемкой приводной печати трех сепарированных черно-белых негативов. Однако последовательное использование четырех цветных пленок создает определенные трудности в обеспечении должного качества результирующей копии.

Еще более простой является система, задействующая цветную обращаемую промежуточную пленку *Eastman Color Reversal Intermediate* (рис. 12.7 [d]).

Когда при фильмокопировании оригинала, снятого на обращаемую пленку, используется также обращаемая пленка, такая технологическая связка носит название *обращаемо-обращаемой* или *позитивно-позитивной* системы (рис. 12.7 [e]), для которой изготавливаются специализированные обращаемые пленки.

Фильмокопии, полученные с помощью позитивно-позитивных систем, могут оказаться очень дешевыми, однако копии, полученные с негативной пленки, — еще дешевле. Поэтому, при достаточном количестве экземпляров, более экономичным (равно как и более гибким) является применение негативной дубль-пленки (*Eastman Color Internegative*) (рис. 12.7 [f]): такая пленка низкоконтрастна, имеет обычные порядок слоев и сенсибилизацию и печатается на обычной *Eastman Color Print*.

Во всех негативных, промежуточных и дубль-пленках использованы оптически активные краскообразующие компоненты, функция которых подробно будет рассматриваться в разделе 15.4. Здесь же отметим, что окрашенные компоненты позволяют компенсировать паразитные поглощения cyan- и magenta-красителями и что их использование исключительно важно во всех системах, где эти красители задействованы на последовательных технологических этапах.

12.12 ЧАСТОТА КАДРОВ

Стандартная частота кадров в кино — 24 кадра в секунду (кадр/с), но иногда ее поднимают до 30 кадр/с, дабы:

— уменьшить мелькание;

— при том же уровне мелькания поднять экранную яркость;

— сгладить движение;

— улучшить прохождение сигнала в телевизионных системах, работающих на 30 кадр/с.

В любительском кино стандартной являлась частота 16 кадр/с у формата 8 мм и 18 кадр/с у формата Super 8.

Заметим, что световой поток прерывается не только при смене кадров, но и во время проекции каждого кадра, поэтому с целью выравнивания экранной яркости частоту поднимают с 24 до 48 кадр/с. При очень высоких экранных яркостях частоту мелькания порой доводят до 72 кадр/с.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Ashton, G.W., Brit. J. Phot., 127, 169 (1980).
Berger, H., Agfacolor, W. Girardet, Wuppertal-Elberfeld, p. 32 (1950).
Capstaff, J.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 54, 445 (1950).
Davies, E.R., Phot. J., 76, 248 (1936).
Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, Wiley, New York, p. 307 (1953).
Fritz, N.L., Proc. Am. Soc. Photogram., Workshop on Color Aerial Photography and Plant Sciences and Related Areas (March 1971).
Hanson, W.T., Phot. Sci. Eng., 21, 293 (1977).
Harrison, G.B., and Spencer, D.A., Phot. J., 77, 250 (1937).
Hornsby, K.M., Brit. J. Phot., 97, 132 (1950).
Koshofer, G., Brit. J. Phot., 113, 644 (1966).
Matthews, G.E., P.S.A. Journal, 21, 33 (1955).
Mees, C.E.K., Phot. J., 82, 300 (1942).
Moser, J.S., and Fritz, N.L., Phot. Sci. Eng., 19, 243 (1975).
Mott, P.G., Photogrammetric Record, 5, 221 (1966).
Photographic Journal, Phot. J., 125, 366 (1985).
Ryan, R.T., A History of Motion Picture Colour Technology, pp. 216–220, Focal Press, London (1977).
Smith, J.T., Manual of Aerial Color Photography, American Society of Photogrammetry, Virginia (1968).
Spencer, D.A., J. Roy. Soc. Arts, 95, 675 (1947).
Tarkington, R.G., and Sorem, A.L., Photogramm. Engng., 29, 88 (1963).
Weissberger, A., American Scientist, 58, 648 (1970).

ЛИТЕРАТУРА

Berger, H., Agfacolor, W. Girardet, Wuppertal-Elberfeld (1950).
Bomback, E.S., Manual of Colour Photography, 2nd Edn., Fountain Press, London (1972).
Collins, R.B., Phot. J., 100, 173 (1960).
Cornwell-Clyne, A., Colour Cinematography, Chapman & Hall, London (1951).
Eastman Kodak Company, Journey: 75 Years of Kodak Research, Eastman Kodak, Rochester NY (1989).
Evans, R.M., Eye, Film, and Camera in Color Photography, Wiley, New York (1959).
Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, Wiley, New York (1953).
Hanson, W.T., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 89, 528 (1980).
Hanson, W.T., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 90, 791 (1981).
Happe, L.B., Brit. Kinematog. Sound Tel., 67, 58, 179, 242, and 418 (1985).
Koshofer, G., Brit. J. Phot., 112, 780 (1965); 113, 562, 606, 644, 920 (1966), and 114, 128 and 1125 (1967).
Mees, C.E.K., From Dry Plates to Ektachrome Film, Chapter 17, Ziff-Davis, New York, (1961).
Ryan, R.T., A History of Motion Picture Colour Technology, Focal Press, London (1977).

13 ТРИХРОМАТИЧЕСКАЯ ФОТОПЕЧАТЬ

13.1 ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что кинокопии всегда выполняются на прозрачном носителе, но в цветной фотографии чаще всего востребованы отражающие отпечатки: дело в том, что несмотря на все достоинства слайдов (низкая цена, высочайшее качество изображений) просмотр диапозитивов сопряжен с массой неудобств — нужны, как минимум, проектор, затемненное помещение, экран и мощный источник электрического тока. Отражающим отпечаткам всего этого не требуется.

13.2 СИСТЕМЫ ПРЯМОЙ ФОТОПЕЧАТИ

На первый взгляд кажется, что простейшим способом получения отражающих отпечатков является съемка на фотоматериал, изготовленный на основе трехслойной эмульсии *Kodachrome* или *Ektachrome* (см. гл. 12), политой на бумажную подложку (т.н. *прямая печать*). Действительно, такой способ имеет право на существование, однако обладает рядом существенных недостатков:

— изображение сцены получается зеркальным (что, правда, преодолимо за счет использования призмы или зеркала перед объективом фотоаппарата, но что и усложняет общую конструкцию системы);[1]

— полученное изображение невозможно увеличить, из-за чего приходится идти на компромисс между размером фотокамеры и размерами отпечатков;

— поскольку фотооттиски практически всегда рассматриваются в контексте какой-либо реальной сцены (жилая комната, выставочный зал и т.п.), допуски на оптические плотности и хроматический баланс у отпечатков меньше, чем у слайдов (обычно демонстрируемых в темном помещении), то есть выше требования к точности экспозиции (при печати).

13.3 ПОЗИТИВНО-ПОЗИТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

На фоне трудностей, возникающих при прямой печати, весьма заманчиво выглядит идея печати со слайдов: в самом деле, можно легко организовать увеличение, кор-

---

[1] Интересное решение в свое время предложила компания Polaroid (система *Polarcolor*): изображение в первый момент после проявления остается жидким, что позволяет перенести его на расположенный вплотную к фотоэмульсии т.н. *приемный лист*, на котором это изображение быстро отвердевает. Поскольку приемный лист всей своей поверхностью плотно прижат к фотоматериалу, то перенесенное изображение будет зеркальным по отношению к первичному изображению (а последнее за счет конструкции камеры зеркально по отношению к сцене) и, следовательно, с верной пространственной ориентацией в отношении оригинала (Land, 1972). Проявление и перенос изображения происходят фактически в самом фотоаппарате, и пользователь может увидеть готовый отпечаток уже через одну минуту после съемки (см. раздел 17.10).

ректировать тональный и хроматический балансы отпечатков, а чтобы избежать зеркального разворота изображения достаточно лишь перевернуть слайд в фотоувеличителе; визуальный выбор желаемых кадров также предельно прост, бо изображение на слайдах позитивное (а не негативное). Неудивительно, что первые системы цветной печати (впервые появились на массовом рынке в 1941 г. в США и в 1954 г. в Великобритании) в качестве промежуточного носителя использовали именно слайды.

Интересно, что в свое время были предложены системы, в которых отпечатки получаются в результате селективного *разрушения готовых красителей*, заложенных в слои этого материала, а не за счет *образования* красителей из куплеров путем цветного проявления. Представителями таких систем являются *Ilford Color Prints*, запущенная в производство в 1954 г., и *Cilchrome* (в дальнейшем *Cibachrome*), позиционированная на рынке в 1964 г. Химический базис этих систем описан в разделе 17.10.

Бумаги, на которых можно печатать прямо со слайдов (то есть дающие позитивные, а не негативные изображения), именуются *цветными обращаемыми фотобумагами*, а системы, построенные на их основе, — *позитивно-позитивными системами*. Некоторые из таких бумаг по сей день широко распространены (например, бумага Ektachrome), и некоторые фотолаборатории до сих пор предоставляют услуги позитивно-позитивной печати.

(Подробнее о позитивно-позитивных системах см. раздел 12.11; об электронной печати см. раздел 16.15).

13.4 НЕГАТИВНО-ПОЗИТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

В пользу съемки на негативные фотоматериалы (с последующим получением с них позитивных отпечатков) существует ряд аргументов (см. ниже). Поскольку по отношению к сцене цветные негативы тонально и хроматически инвертны, они явно не предназначены для конечного просмотра, и, следовательно, при производстве негативов их характеристиками можно и нужно управлять, добиваясь максимального качества позитивных отпечатков. То есть:

— негативные материалы могут иметь низкую гамма и характеристические кривые с длинным линейным участком (в отличие от диапозитивных материалов, которые во имя адекватной визуальной контрастности результирующих изображений должны иметь высокую гамма). Последнее позволяет негативным пленкам достигать большой фотографической широты, то есть избегать т.н. *пробоя* на особо высоких оптических плотностях;

— с целью компенсации паразитного поглощения красителями в негативы можно беспрепятственно вводить оптически активные краскообразующие компоненты (см. раздел 15.4);

— негативные фотоматериалы принципиально проще в изготовлении и обработке, чем материалы обращаемые.

Итак, неудивительно, что негативно-позитивные системы получили широчайшее распространение.

13.5 ИНТЕРНЕГАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

Еще один метод получения позитивных отпечатков, сходный с позитивно-позитивным процессом, — это т.н. *интернегативный метод*, в котором отправной точкой репродукционного процесса является диапозитив. В интернегативном процессе негатив

получают с оригинального цветного диапозитива, а затем тиражируют изображение посредством печати с этого негатива на обычной негативной фотобумаге.

Отметим, что интернегативная стадия процесса — это удобный момент для осуществления нецифровой цветокоррекции, что крайне важно, поскольку троекратное использование наборов голубого, пурпурного и желтого красителей (в диапозитиве, в промежуточном негативе и в фотобумаге) приводит к тому, что недостатки, свойственные этим красителям (в частности, такие, как паразитные поглощения), становятся особо заметными. Следовательно, на какой-то из стадий процесса (лучше всего на стадии промежуточного негатива) весьма желательно применение оптически активных краскообразующих компонент (масок).

Более того, если интернегативные пленки изготавливать с высоким значением гамма в высоких светах тоновой шкалы, оставляя при этом гамма теневого участка нетронутой (см. рис. 14.10), то можно слегка подкорректировать снижение контрастности переэкспонированных (светлых) слайдов. Тенденция к снижению контрастности у переэкспонированных диапозитивов является следствием того, что последние ориентированы на рост гамма тонопередачи по мере роста оптической плотности. Рост гамма тонопередачи необходим для адекватного тоновоспроизведения при проекционном просмотре в затемненном помещении — см. раздел 6.5).

Таким образом, в сравнении с позитивно-позитивными системами, системы интернегативные имеют больше возможностей тоновой и цветовой коррекции.

Вместе с тем необходимость в использовании промежуточных негативов ведет:

— к удорожанию цветорепродукционного процесса (хотя, разумеется, себестоимость отпечатков падает при увеличении числа экземпляров);

— к технологическому усложнению цветорепродукционного процесса;

— к возможному снижению резкости изображения (если не приняты специальные меры).

13.6 ПЕЧАТЬ С ЭЛЕКТРОННЫХ ОРИГИНАЛОВ

Когда необходима печать изображения, закодированного в виде электрических сигналов (цифрового изображения), эти сигналы можно использовать с целью получения негативных изображений на электронно-лучевых трубках (или на каком-либо ином устройстве визуализации телевизионного типа), экспонирующих обычную негативную фотобумагу. Однако сегодня широкое распространение получили альтернативные методы, такие, как лазерная электрофотография, термотрансферная печать (Sony, 1982), термовосковая печать, струйная печать (см. разделы 16.15, 20.15 и гл. 33).

13.7 ОСНОВНЫЕ ТРУДНОСТИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ФОТОПЕЧАТИ НА ОТРАЖЕНИЕ

Помимо обычных проблем, при воспроизведении слайдов возникают три дополнительных проблемы, причем независимо от способа печати, а именно:

— влияние окружения;

— влияние переотражений в слоях;

— сужение тонового диапазона, вызванное отражением света от поверхностного слоя фотобумаги.

13.8 ВЛИЯНИЕ ОКРУЖЕНИЯ

Первая трудность состоит в том, что при просмотре фотоотпечатков прочие предметы, находящиеся в поле зрения, задают некие эталонные точки визуальной оценки светлоты и хроматического баланса, благодаря чему любые погрешности по этим параметрам легко заметны. Вместе с тем, при проекционном показе слайдов (который обычно проводится в затемненном помещении) у наблюдателя нет практически никаких визуальных ориентиров, и, следовательно, отклонения слайда по тональному и хроматическому балансам часто остаются незамеченными. Поэтому стандартные допуски по тону и хроматике у печати на отражение меньше, чем у слайдов (см. гл. 16).

Подробно о влиянии окружения на визуальный контраст отпечатков и полноту цвета их элементов см. в разделах 6.5, 6.8 и 7.9.

13.9 ПЕРЕОТРАЖЕНИЕ В СЛОЯХ ФОТОМАТЕРИАЛА

Вторая проблема, возникающая при печати на отражение, есть следствие того, что красители, образующие изображение, находятся в слое, который одной стороной прилежит к светорассеивающей бумажной поверхности, а другой соприкасается с воздухом из-за чего свет, отраженный от бумажной основы отпечатка, проходит сквозь слои красителей как минимум трижды — рис. 13.1.

Показатель преломления желатина (носитель фотоэмульсии) — 1.5. сие значит, что свет, отраженный от бумажной основы, расположенной непосредственно под желатином, может вернуться назад к наблюдателю (т.е. пройти сквозь желатин в обратном направлении) только тогда, когда не выходит за пределы угла в 40° от нормали к поверхности желатина (т.н. *критический угол* или *предельный угол*). Свет, отраженный за пределы сорокаградусного конуса, полностью возвращается к поверхности бумаги, рассеивается и вновь пытается выйти наружу.

Бумага отражает свет по всем направлениям. Доля лучей, уходящих из желатина после первого отражения, составляет менее половины от общего количества упавшего света — всего 38.6% (Williams и Clapper, 1953). Остаток света вновь падает на бумагу и вновь отражается (то есть делает четыре прохода вместо двух), вдвое увеличивая при этом оптические плотности всех элементов изображения. При этом опять лишь 38.6% света выходит из желатинового слоя наружу, а остаток вновь делает два прохода (в сумме уже шесть), часть света опять возвращается и т.д. То есть мы видим, что оптические плотности на отражение определяются не двойным проходом света через желатин, а несколькими проходами.

Рост оптической плотности элементов изображения, измеренной в отраженном свете (т.н. *оптическая плотность на отражение*), зависит от оптической плотности эмульсионного слоя, измеренной в свете проходящем (т.н. *оптическая плотность на пропускание*). При этом, когда оптическая плотность на отражение элементов изображения очень высока, вклад в эту плотность многократно отраженного света очень мал, но когда она мала — свет, отраженный четыре, шесть и даже порой восемь раз (и более) дает весьма заметный эффект.

Теперь допустим, к примеру, что эмульсионный слой пропускает только 1/10 падающего света, то есть его оптическая плотность на пропускание равна 1.0D.[1] Интен-

[1] Оптическая плотность на пропускание — это Lg(100/T), где T — пропускательная способность материала в %.

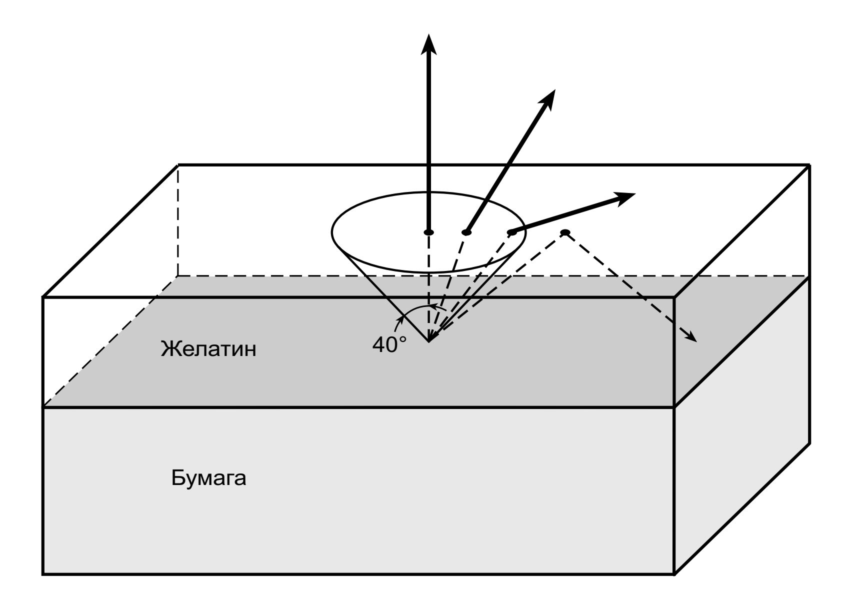


Рис. 13.1 Коэффициент преломления желатина равен 1.5, поэтому свет, отраженный от бумаги в рамках 40° полуугла способен выйти наружу. Остальной свет полностью переотражается.

сивность света, который дважды прошел сквозь эмульсионный слой, упадет, соответственно, в 100 раз, что эквивалентно результирующей оптической плотности 2.0D, а интенсивность света, который прошел сквозь эмульсионный слой четырежды, снизится в 10000 раз от первоначальной (правда, визуально в обычных просмотровых условиях это уже мало чем отличается от падения в сто раз). Однако, когда эмульсионный слой фотоматериала имеет оптическую плотность на пропускание всего лишь 0.15D, интенсивность света, дважды прошедшего через эмульсию, даст эффективную оптическую плотность 0.3D; четырежды прошедшего — 0.6D; прошедшего шесть раз — 0.9D и т.д., то есть соответствующие снижения интенсивностей (до 1/2, 1/4, 1/8 и т.д.) — это весьма заметные доли от общего количества падающего света. Таким образом, низкие оптические плотности эмульсии на пропускание усиливают оптические плотности на отражение существенно больше, чем путем простого удвоения, однако по мере повышения оптических плотностей элементов отпечатка *коэффициент усиления оптической плотности* начинает плавно снижаться (рис. 13.2).

Коль скоро мы говорим о поглощениях в слоях цветных отражающих отпечатков, то не можем обойти стороной два важных аспекта данного вопроса:

— во-первых, на тех участках, что должны быть белыми, не должно быть никаких следов красителей, поскольку, как видно из рис. 13.2, очень низкие оптические плотности на пропускание усиливают оптические плотности на отражение в пять раз и более;

— во-вторых, поскольку на малых оптических плотностях паразитные поглощения голубым, пурпурным и желтым красителями больше, чем поглощения полезные, то первые на малых оптических плотностях повышают оптическую плотность больше, чем вторые и, следовательно, оказывают гораздо большее влияние на восприятие изображений, выполненных на отражающих материалах (по сравнению с пропускающими).

Напомним, что паразитные поглощения ведут к «расползанию» кривой спектрального поглощения красителей (рис. 13.3) (Evans, Hanson и Brewer, 1953), и здесь мы вновь убеждаемся в том, что на малых оптических плотностях у отражающих отпечатков коэффициент усиления оптической плотности больше, чем на плотностях высо-

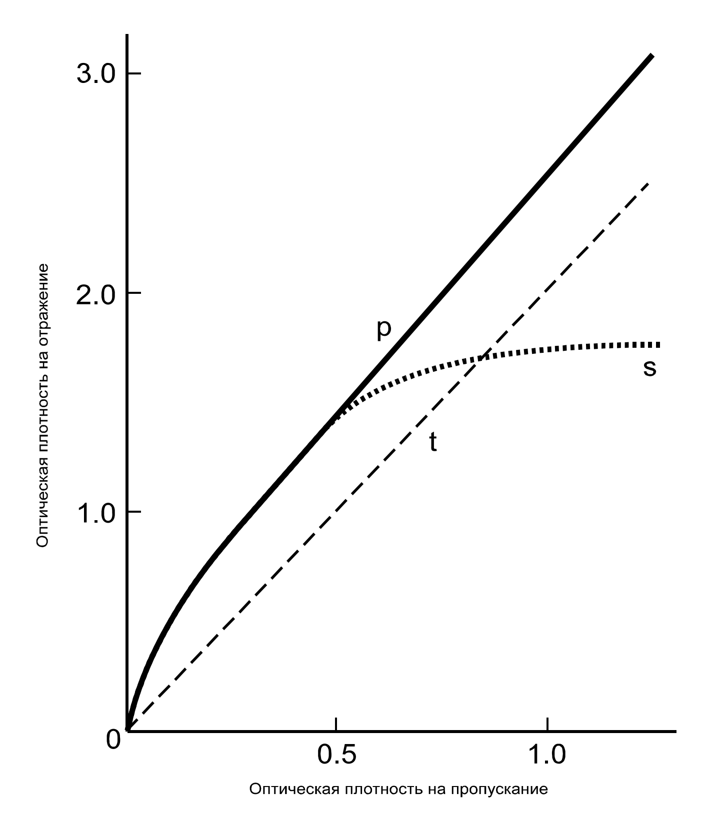


Рис. 13.2 Оптическая плотность на отражение (элементов фотоотпечатка) как функция от оптической плотности на пропускание (эмульсионного слоя): p — красочный слой в оптическом контакте с диффузно отражающей белой подложкой (отпечатки); t — оптический контакт отсутствует и оптическая плотность на отражение равна удвоенной оптической плотности на пропускание; s — изменение кривой «p» под воздействием поверхностных отражений в типичных бытовых условиях просмотра.

ких. Таким образом, несмотря на то, что для достижения требуемой величины пика плотности в отражающем изображении требуется почти вдвое меньшая концентрация красителя, чем в диапозитиве, поглощения на длинах волн, лежащих вне пика, усилены больше, и, следовательно, эффективное поглощение красителя будет менее спектрально-селективным (то есть более «размазанным»).

Из сказанного выше следует вывод о том, что даже тогда, когда в отражающих отпечатках используются красители химически эквивалентные красителям диапозитивов, полосы их поглощения шире (то есть паразитные поглощения больше), что ведет к снижению колориметрической чистоты и фотометрической яркости воспроизводимых стимулов.

13.10 ДИНАМИЧЕСКИЕ ДИАПАЗОНЫ

Возникновению третьей проблемы фотоотпечатки обязаны своему поверхностному слою: этот слой неизбежно отражает некоторое количество света, который не проходит вглубь эмульсии и являет собой обычную белую паразитную подсветку, снижающую колориметрическую чистоту элементов изображения и, соответственно, их чистоту цвета (что особенно заметно на темных участках кадра). Однако более значимым, чем снижение колориметрической чистоты элементов изображения, является сужение

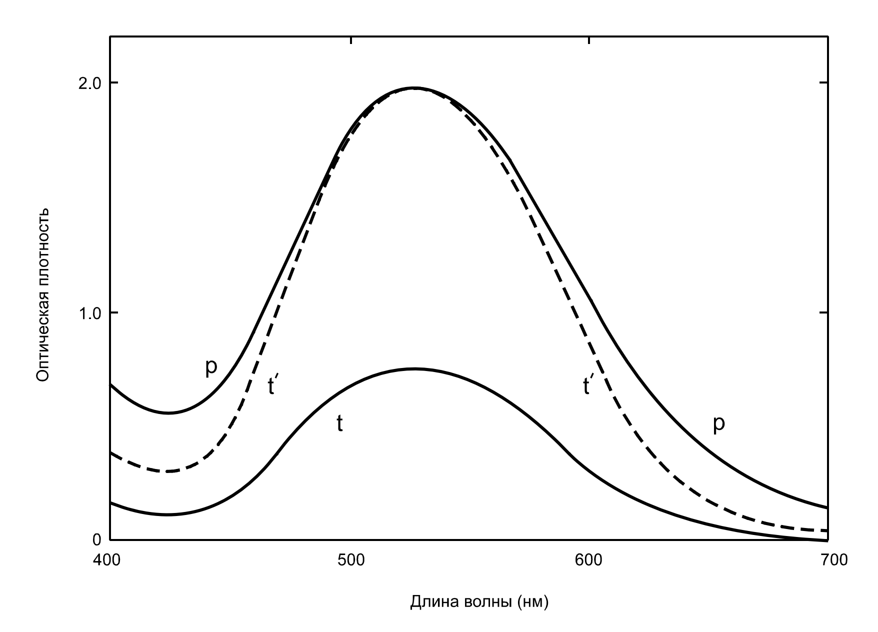


Рис. 13.3 Кривые спектрального поглощения одних и тех же красителей: t — в диапозитивном фотоматериале; p — в отражающем фотоматериале; t' — t-кривая, умноженная на коэффициент 2.61, дабы пик оптической плотности совпал с пиком p-кривой. Хорошо видно, что кривая p шире и что паразитные поглощения в отражающем фотоматериале больше.

диапазона воспроизводимых яркостей (т.н. *динамического диапазона изображения*), вызванное поверхностным отражением.

13.10.1 Слайды

Джонс и Кондит (Jones и Condit, 1941) показали, что диапазон десятичных логарифмов фотометрических яркостей уличных сцен лежит в пределах от 1.45D до 2.8D[1] и в среднем равен 2.2D (то есть от 28:1 до 630:1; среднее — 158:1). Типичная максимальная оптическая плотность на пропускание диапозитивов лежит в районе 3.0D, что соответствует тоновому диапазону 1000:1, то есть теоретически проектированный слайд в состоянии воспроизвести максимально возможный диапазон относительных яркостей уличных сцен. Однако измерения типичных максимальных и минимальных яркостей экранных проекций слайдов показали, что их диапазон не превышает 2.1D то есть, 126:1 (Estes, 1953; Hunt, 1965a). Разница объясняется рядом факторов:

— во-первых, полностью экспонированные (засвеченные) участки слайдов обладают некоей определенной оптической плотностью на пропускание (вуаль), равной примерно 0.2D и выше;

— во-вторых, когда белые объекты воспроизводятся на оптических плотностях вуали, они передаются некорректно и выглядят плоскими (т.е. без каких-либо тоновых модуляций). Следовательно, для воспроизведения белых объектов с адекватными тоновыми градациями их оптические плотности должны быть выше, чем оптическая плотность вуали (что может давать потерю еще 0.2 единиц плотности);

---

[1] Как и в случае оптических плотностей, десятичный логарифм отношения фотометрических величин обозначается литерой «D». Однако в первом случае она означает «Density» (плотность), а во втором — «Dynamic range» (динамический диапазон). — *Прим. пер.*

— в-третьих, когда фотометрическая яркость темного экрана на 3.0D меньше, чем яркость экрана от открытого проектора (характерно для хороших проекционных условий), то минимальная фотометрическая яркость неэкспонированных (самых темных) участков слайда на экране будет равна двойной яркости темного экрана, то есть на 0.3D выше экранной яркости черной точки слайда при его проекции без паразитной подсветки;

— в-четвертых, из-за виньетирования объектива фотоаппарата, а также из-за падения экранной яркости углов изображения вследствие виньетирования объектива проектора, типичный максимум яркости изображения снижается еще на 0.2D (отметим, что лишь изредка зона максимальных яркостей приходится на центр кадра, то есть на зону максимальных яркостей проектора).

Все перечисленные факторы в сумме снижают тоновый диапазон экранного изображения на 0.9D от исходных 3.0D, то есть до 2.1D.

Однако эффект темного окружения, понижающий визуальный контраст проекционного изображения (см. раздел 6.5), делает диапазон воспроизведенных яркостей (2.1D) визуально эквивалентным лишь 1.4D реальной сцены, что ощутимо меньше визуального тонового диапазона уличных сцен при среднем диапазоне яркостей их объектов 2.2D.

13.10.2 Отражающие отпечатки

Когда аналогичные измерения выполняются в отношении отражающих отпечатков, рассматриваемых в средних просмотровых условиях, тоновый диапазон изображений оказывается еще меньше, чем у слайдов.

Впрочем, цветную фотобумагу можно изготовить так, что благодаря высокому глянцу ее поверхности результирующий черный будет иметь максимальную оптическую плотность 2.4 и выше. Однако, как и в случае слайдов, диапазон яркостей отпечатка все равно будет снижен за счет ряда факторов:

— во-первых, оптическая плотность вуали цветных фотобумаг обычно держится в районе 0.1D;

— во-вторых, 0.2D обычно теряются из-за необходимости воспроизведения модуляций в светах («белые» тона) на относительно высоких оптических плотностях.

Отметим, что виньетирование в негативно-позитивном процессе не столь значимо, поскольку виньетирование в оптической системе фотоувеличителя, что компенсирует виньетирование в объективе фотокамеры. Вместе с тем в позитивно-позитивных системах виньетирование ведет к ощутимым потерям результирующей яркости элементов изображения.

Перечисленные факторы сокращают тоновый диапазон изображений в целом на 0.3D, но еще 2.1D остается в запасе. Однако измерения показывают, что фактический диапазон фотометрических яркостей стимулов репродукции, воздействующих на зрение, лежит в пределах 0.3—1.5D, то есть составляет всего 1.25D (Hunt, 1965 [a]). Следовательно, куда-то пропадают еще 0.85D, и очевидно, что причина тому — отражение света от поверхностного слоя отпечатков. Отметим, что аналогичные цифры были получены в свое время и по черно-белым фотобумагам (Carnaham, 1955).

Объяснение того, почему при рассматривании отпечатков в типичных условиях их просмотра максимальные оптические плотности, измеренные денситометром, из 2.4D вдруг превращаются в 1.55D, находим на рис. 13.4: верхняя половина схемы (a) демонстрирует денситометрическую ситуацию, при которой световой поток от лампы

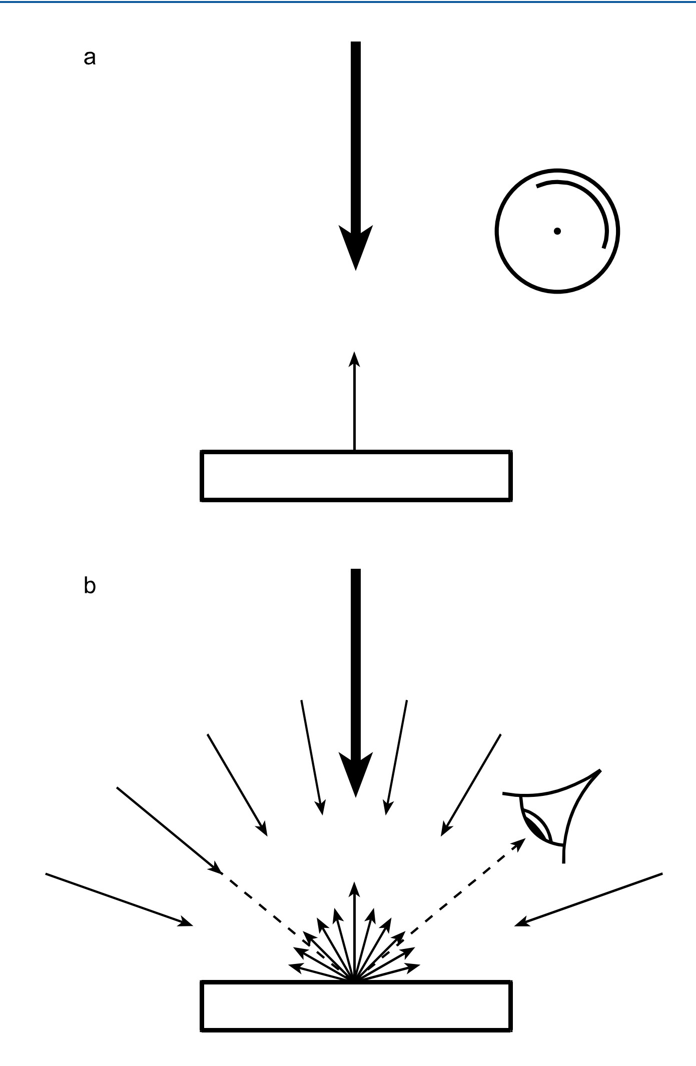


Рис. 13.4 a — когда свет падает по нормали к поверхности, зеркальный компонент отраженного света не попадает в фотоэлемент, направленный под 45°; b — в типичных условиях не имеет значения то, с какой позиции ведется просмотр отпечатка: часть зеркально отраженного света обязательно попадает на сетчатку глаза, что ограничивает восприятие стимулов минимальных энергий (то есть получаемых от участков поверхности с максимальными оптическими плотностями).

прибора идет перпендикулярно плоскости отпечатка (отраженный свет при этом возвращается в основном по тому же пути). Следовательно, фотоэлемент денситометра, расположенный под 45° к нормали на поверхность отпечатка, ловит только диффузно отраженный свет, то есть многократно прошедший через эмульсионный слой фотоматериала и, соответственно, сильно ослабленный. Надо отметить, что коэффициент отражения внутренней поверхности денситометра, зеркально отражающей свет в направлении фотоэлемента, минимизирован настолько, насколько возможно. То есть воздействие света, отраженного от поверхностного слоя отпечатка, практически исключается из показаний прибора.

Нижняя часть схемы (b) иллюстрирует обычные условия просмотра отражающих отпечатков: независимо от того, с каких направлений освещена фотография (по одному или по нескольким), некоторая часть света всегда будет падать на снимок со всех возможных направлений, поскольку поверхности в помещении обладают определен-

ными яркостями. Следовательно, не имеет принципиального значения, как именно по отношению к отпечатку расположен наблюдатель, — зеркально отраженный свет, пришедший от какого-либо предмета в помещении, обязательно попадает на сетчатку глаза и помешает восприятию стимулов минимальных энергий.

Итак, мы видим, что величина 1.55D представляет максимальную оптическую плотность, которой можно достичь в обычных просмотровых условиях. Влияние этого фактора на взаимоотношения между оптической плотностью на отражение и оптической плотностью эмульсионного слоя на пропускание, нам продемонстрирует точечная линия рис. 13.2.

Стоит отметить, что величина 1.55D не зависит от величины максимальной оптической плотности, зафиксированной денситометром, когда эта плотность выше или равна 2.0D. При этом нельзя говорить, что максимальные оптические плотности вообще не играют никакой роли, если они больше 2.0D: изменения в наклоне сторон кривой спектрального поглощения красителя при изменении его максимально возможной концентрации в цветном отпечатке могут отразиться на воспроизведении тех стимулов, что призваны обладать высокой колориметрической чистотой, причем даже тогда, когда восприятие черных объектов ничем не нарушено.

Далее: величина 1.55D чаще встречается в ситуации направленного освещения, скажем, лампами накаливания, но в помещениях, освещенных рассеянным светом, она может не превысить 1.40D. В экстравагантной просмотровой обстановке, такой, как, скажем, солнечный свет на дне глубокой угольной шахты или же, что реальнее, при свете проектора посреди затемненного помещения, удается достичь максимальной оптической плотности порядка 1.75D и даже приблизиться к показаниям денситометра.

Следовательно, в заурядных условиях просмотра максимальный диапазон фотометрических яркостей стимулов, воспроизведенных цветным отпечатком, будет равен 1.55D за вычетом 0.3D (потери, описанные выше), то есть не более 1.25D (18:1). Таким образом, данный диапазон меньше, чем у проектированных слайдов (2.1D в темном окружении, что визуально эквивалентно 1.4D в среднем окружении — см. выше) и много меньше, чем средний динамический диапазон уличных сцен (2.2D). Таким образом, несмотря на то, что и в слайде, и в отпечатке присутствуют оптические плотности меньшие, чем те, что необходимы адекватной передаче тоновых модуляций в высоких светах сцены, — и в слайдах, и в отражающих отпечатках имеет место определенная компрессия светов и теней (у отпечатков в большей степени), что видно по рис. 6.14. Когда же слайды проектируются в освещенном помещении или когда отпечатки выполнены на матовой бумаге, скажем, газетной, то диапазон яркостей еще снижается.

Опытный фотограф, готовя сцену для съемки на негатив (и последующей печати), всегда заботится о том, чтобы все сюжетно значимые объекты находились внутри весьма ограниченного диапазона яркостей, то есть: в регистрируемой сцене не должны доминировать глубокие тени. Но даже при должной подготовке регистрация ряда сцен остается очень трудной, к примеру: при съемке и печати свадебных сюжетов, в которых света организованы платьем невесты, а тени — костюмом жениха, очень трудно одновременно уйти от потери деталей в светах в первом случае и от «завала» теней — во втором (см. рис. 13.5).

Иногда при съемке уличных сцен весьма полезно заполнить глубокие тени светом ксеноновой или подсиненной фотовспышек. Сходных результатов можно добиться, используя должным образом расставленные белые или металлические отражатели.

Итак, с помощью описанных выше и некоторых других приемов можно оптимизи-



Рис. 13.5 Воспроизведение деталей и тоновых модуляций в светах и тенях одинаково сложно из-за узкого диапазона воспроизводимых яркостей. В особенности это касется фотоотпечатков (см. раздел 13.10). Чаще всего сложности возникают при работе с изображениями свадебных сцен, поэтому персонажи снимков должны быть освещены по возможности равномерно (как в данном примере). Когда невеста оказывается на ярком солнечном свету, а жених в глубокой тени, получить высококачественный снимок практически невозможно.

ровать освещение и привести динамический диапазон фиксируемой сцены к требуемому значению (рис. 13.6).

13.11 УРОВНИ ЯРКОСТИ

Мы знаем, что субъективная яркость стимула сильно зависит от статуса адаптации зрительной системы наблюдателя. К примеру, фары автомобиля, ослепляющие нас в темноте, при ярком солнечном свете воспринимаются как тусклые лампочки, то есть их субъективная яркость радикально падает, но при этом яркость фотометрическая остается постоянной — при сравнении динамического диапазона слайдов с диапазоном отпечатков данным фактом нельзя пренебрегать. Отметим, что учет условий адаптации предполагает в том числе учет *абсолютных* фотометрических яркостей элементов адаптирующего поля.

При освещенности проекционного экрана порядка 100 лк (лм на м^2) фотометрическая яркость белых объектов будет сравнима с таковой у отражающих отпечатков при

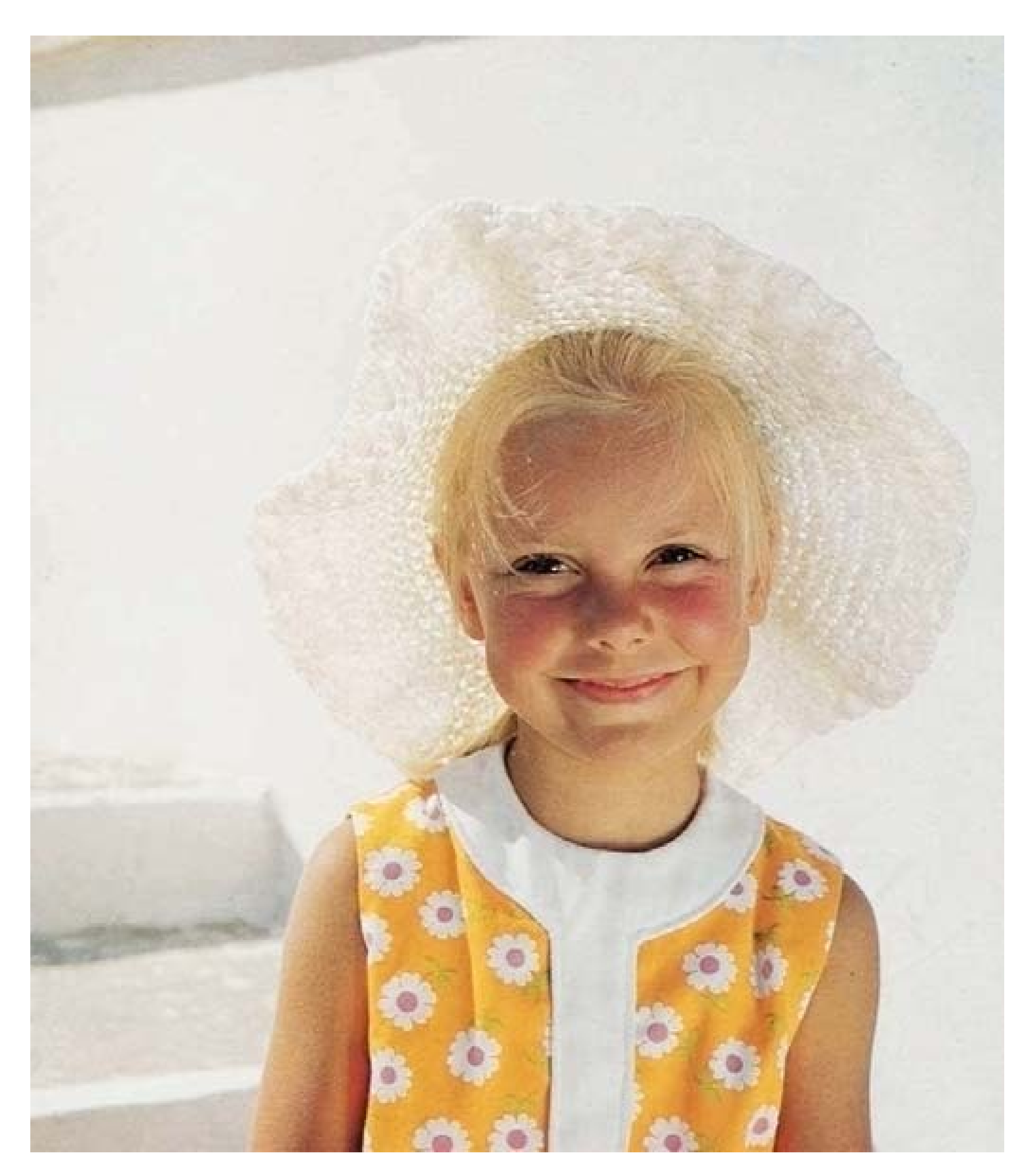


Рис. 13.6 Качество портретов, выполненных на ярком солнечном свету, можно повысить, заполняя тени светом вспышки, фотоосветителей или отражателей (см. раздел 13.10). В данном случае была использована вспышка. Аналогичного эффекта можно добиться, выбирая позицию со светлым передним планом.

освещенности последних порядка 50 лк (приведенные цифры соответствуют слабым домашним слайд-проекторам и комнатному освещению лампами накаливания). Вместе с тем чаще встречаются проекторы, дающие более 500 лк экранной освещенности (см. Приложение А3.5), и, безусловно, освещенность многих жилых помещений существенно больше 50 лк. Во всех четырех случаях фотометрическая яркость белых стимулов будет примерно одинаковой. Что же произойдет с яркостью субъективной?

Мы знаем, что при проекции слайдов темное окружение дает эффект повышения субъективной яркости элементов изображения или, как его еще называют, эффект *субъективной редукции серого*. При рассматривании отпечатков редукции серого, как

правило, не возникает. В результате белые предметы на экранной проекции слайда смотрятся белее, чем на фотоотпечатке. Более того, как было показано, слайды обладают бо́льшим диапазоном оптических плотностей, которого обычно вполне достаточно для того, чтобы черные объекты выглядели максимально черными. Таким образом, преимущества слайда очевидны: белый — белее, черный — чернее. Однако при рассматривании отпечатков на ярком солнечном свету уровень освещенности может достигать 50000 лк, что много больше той освещенности, которую в состоянии выдать самый мощный проектор. Что же при этом произойдет с субъективной яркостью элементов изображения?

Некоторые данные для ответа на этот вопрос можно получить, обратившись к методике гаплоскопического уравнивания (см. раздел 8.10), которая будет описана ниже (Hunt, 1965a).

В данном случае эксперимент по гаплоскопическому уравниванию был организован так: левым глазом наблюдатель беспрепятственно воспринимал сцену, в то время как его правому глазу предъявлялось белое поле с угловым размером 15° и фотометрической яркостью 3600 кд/м^2. В центре поля была расположена точка с угловым размером 1.5°, цветностью и фотометрической яркостью которой наблюдатель мог варьировать, благодаря чему весь диапазон субъективных яркостей стимулов сцены, воспринятых левым глазом, мог быть визуально уравнен со стимулом центральной точки, воздействующим на правый глаз. Таким образом, фотометрические яркости экспериментального стимула, необходимые для визуального уравнивания стимулов сцены (воздействующих на левый глаз), были мерой субъективной яркости последних.

Эксперимент был выполнен по одному белому и четырем серым образцам, взятым с тест-карты, содержащей нейтральную шкалу из шести полей и 18 окрашенных патчей. Результаты даны на рис. 13.7: на логарифмической шкале оси ординат, размеченной так, что ее интервалы аппроксимируют интервалы шкалы манселловской светлоты, отложены фотометрические яркости центральной точки (правый глаз). Фотометрическая яркость окружения (по правому глазу) произвольно отмечена на уровне точки, которой присвоена манселловская светлота со значением 6. Все точки серии 1 относятся к белому полю шкалы; серии точек, отмеченные 2, 3, 4, 5 — соответственно к серым полям по мере их потемнения. Варианты условий просмотра по левому глазу отложены по оси абсцисс и отмечены вверху (распределение условий просмотра по шкале абсцисс произвольно, за исключением того, что их взаиморасположение организовано по росту освещенности сцены и с попыткой получить при этом более или менее линейный рост субъективной яркости белого стимула).

Условия просмотра, отмеченные как «Проектор с лампой накаливания, 160 лк», представляли собой темное помещение, в котором тест-карта была освещена лучом проектора, создававшим пятно, покрывающее лишь самою карту (то есть не выходящее за ее углы). Таким образом, экспериментальные условия просмотра полностью имитировали условия проекционного показа слайдов.

Итак, мы видим, что точка 1 по условиям «Проектор с лампой накаливания, 160 лк» расположена выше, чем такая же точка по условиям просмотра в помещении с лампами накаливания и освещенностью карты в 24 лк, но при этом ниже, чем соответствующие точки при освещении карты ксеноновыми дуговыми лампами (1080 лк освещенности), северным небом (4300 лк), облачным небом (10800 лк), ярким солнцем (43000 лк).

Стоит обратить внимание на то, что, поскольку в последних четырех вариантах условий тест-карта рассматривалась в обычной обстановке и не была окружена полем с

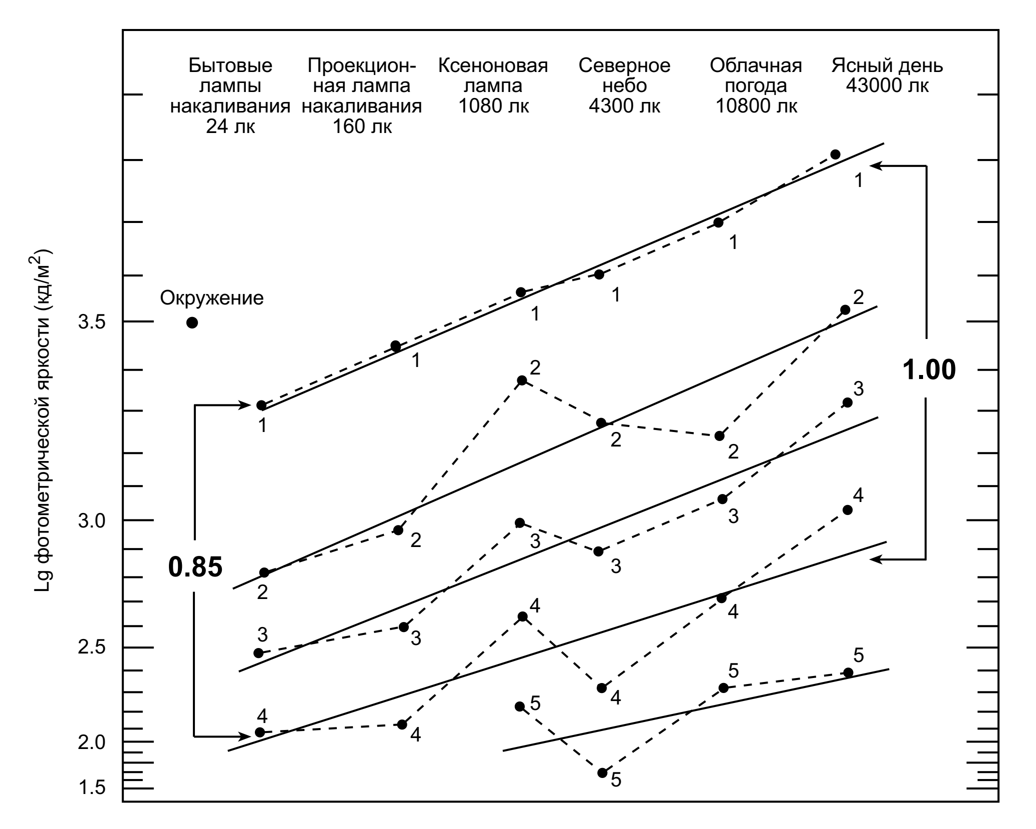


Рис. 13.7 Логарифмы фотометрических яркостей 1.5-градусной центральной точки в 15-градусном окружении при 3600 кд/м^2, необходимых для воспроизведения стимулов тех же субъективных яркостей, что и стимулы, полученные от белого (1) и ряда серых (2, 3, 4, 5) образцов в шести вариантах условий просмотра.
Коэффициенты отражения образцов:
1 — 85.0%
2 — 21.5%
3 — 13.3%
4 — 5.3%
5 — 1.7%
Если визуальную контрастность, представленную интервалами между сериями 1 и 4, принять за единицу, то в помещении, освещенном лампами накаливания, она будет равна 0.85 по шкале манселловского типа с манселловской светлотой окружения отпечатков равной 6.

очень низкой фотометрической яркостью (как в случае проекционного освещения), выраженный рост общей освещенности мог (за счет паразитной подсветки карты объектами сцены) привести эксперимент к бóльшим цифрам субъективной яркости белых образцов, чем при прочих равных, но с темным окружением тестового стимула.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что даже тогда, когда отпечатки рассматриваются в помещении, освещенном дневным светом на уровне 1000 лк, воспроизводимые ими белые стимулы будут восприниматься с бóльшими субъективными яркостями, чем в случае просмотра в свете проектора при 160 лк. Таким образом, несмотря на то, что динамический диапазон отпечатков остается весьма узким, восприниматься они будут радикально лучше, если рассматривать их при хорошем освещении (что полностью подтверждается практикой).

Любопытно, что интервалы между точками, представляющими белые поля карты,

и между точками, представляющими серые, — при всех условиях просмотра примерно одинаковы, и, коль скоро данный эксперимент согласован с манселловской шкалой светлоты, относительное равенство интервалов указывает на относительное постоянство визуальной контрастности серой шкалы по всему диапазону условий (несмотря на то что субъективная яркость полей, безусловно, меняется). Вместе с тем при снижении фотометрических яркостей полей все же имеет место некоторое падение визуальной контрастности (с 1.00 до 0.85) — что подтверждают, в частности, Бренеман и Стивенс (Breneman, 1962; Stevens, 1961) — поэтому всегда нужно помнить о том, что при смене окружения интервалы между обсуждаемыми точками на манселловской шкале светлоты будут слегка меняться.

Из общей картины эксперимента следует, что самый темный серый (точка 5) имеет тенденцию сливаться с черным при падении освещенности до 24 лк, что в целом согласуется с одним из главных законов зрительного восприятия. Однако точность гаплоскопического метода при высокой фотометрической яркости поля, окружающего экспериментальный стимул, очень низкая, когда речь идет о стимулах малых энергий (темных и черных), поэтому позиции соответствующих точек на графике не очень верны. Фактически самый темный серый (5) вообще нельзя измерить при первых двух (наименьших) уровнях освещенности (вероятно, именно поэтому в эксперименте не зафиксирован эффект снижения контрастности серой шкалы при темном окружении карты, освещенной лампой проектора [условия 2]).

Однако психофизические эксперименты Стивенса по визуальному шкалированию субъективной яркости в свое время показали, что при падении уровня освещенности восприятие темно-серых стимулов остается почти неизменным, тогда как субъективная яркость черных — *растет* (Stevens, 1961).

Как обсуждалось ранее, при росте уровня освещенности повышается не только субъективная яркость элементов отражающего изображения, но также отмечается существенный рост их полноты цвета (Hunt, 1952 и 1965b), то есть, мы имеем еще один аргумент в пользу того, что восприятие цветных фотоотпечатков можно улучшить, рассматривая их при ярком свете (Bartleson, 1965). Вместе с тем не существует однозначного ответа на вопрос «чему отдать предпочтение — слайдам при 100 лк освещенности проекционного экрана или отпечаткам при 1000 лк общего освещения?»; правда, мы помним, что качество отпечатков снижает еще ряд факторов (переотражения в слоях, легко заметные пятна и грязь на поверхности, легко заметные отклонения от оптимума по оптическим плотностям и хроматическому балансу), из-за чего можно все-таки отдать предпочтение слайдам. Однако в контексте разговора о субъективной яркости белых элементов фотоотпечатки, несомненно, выигрывают, и, если печать выполнена грамотно, низкий тоновый диапазон фотографий не окажет существенного влияния на результат их визуального восприятия.

Сказанное в свое время было показано на «Всемирной выставке технических достижений» в Нью-Йорке (1964—65 гг.), где отпечатки демонстрировались на очень высоких уровнях направленного освещения, благодаря чему воспринимались не хуже слайдов (Bartleson, Reese, Macbeth и James, 1964). Однако поскольку их освещенность была выше уровня освещенности окружения, то, благодаря уже упоминавшейся «редукции серого» (возникшей за счет эффекта т.н. симультанного контраста), субъективная яркость белых элементов изображений, представленных на выставке, оказалась необычно высокой.

13.12 ГЕОМЕТРИИ ОСВЕЩЕНИЯ И ГЕОМЕТРИИ ПРОСМОТРА

Как было показано в разделе 13.10, от поверхностного слоя фотобумаг всегда отражается некоторое количество света, что снижает диапазон воспроизводимых ими тонов. В денситометрах свет, как правило, падает перпендикулярно измеряемой поверхности (см. рис. 13.4), а датчики фиксируют отраженную энергию под 45° к этому перпендикуляру (или же, наоборот: свет падает под 45°, а замер производится по нормали), что позволяет минимизировать эффект поверхностных переотражений. Те же конфигурации освещения и замера используются и в колориметрии (Hunt, 1998) и обозначаются, соответственно, как «0/45» и «45/0».

Однако, когда необходимы измерения, учитывающие просмотровую ситуацию в данном помещении, образцы освещают с помощью т.н. *фотометрического шара* (*шара Ульбрихта*), а замер производится по нормали к поверхности (или же, наоборот — поверхность освещается по нормали, а отраженный свет собирается фотометрическим шаром). Такие геометрии измерения также используются в колориметрии и называются соответственно «diffuse/0» («d/0») и «0/diffuse» («0/d»)[1].

Фотометрический шар может содержать в себе т.н. *ловушку*, поглощающую зеркально отраженный свет, и в этом случае измерение будет называться «измерением с исключенным зеркальным компонентом» (SPEX — Specular Excluded) в противоположность «измерению с включенным зеркальным компонентом» (SPINC — Specular Included).

SPEX-измерения более или менее согласуются с условиями диффузного освещения (какое бывает в помещении с несколькими источниками света), при расположении образца под оптимальным углом (т.е., позволяющим уйти от большинства зеркальных отражений от поверхности отпечатка).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Bartleson, C.J., Reese, W.B., Macbeth, N., and James, J.E., Illum. Eng., 59, 375 (1964).
Bartleson, C.J., Phot. Sci. Eng. 9, 174 (1965).
Breneman, E.J., Phot. Sci. Eng. 16, 172 (1962).
Carnahan, W.H., Phot. Eng., 6, 237 (1955).
Estes, R.L., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 61, 257 (1953).
Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, p. 365, Wiley, New York, London (1953).
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 42, 190 (1952).
Hunt, R.W.G., J. Phot. Sci., 13, 108 (1965a).
Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 55, 1540 (1965b).
Hunt, R.W.G., Measuring Colour, 3rd Edn., Chapter 5, Fountain Press, Kingston-upon-Thames (1998).
Jones, L.A., and Condit, H.R., J. Opt. Soc. Amer., 31, 651 (1941).
Land, E.H., Brit. J. Phot., 119, 858 (1972).
Sony, Brit. J. Phot., 129, 363 (1982).
Stevens, S.S., Science, 133, 80 (1961).
Williams, F.C., and Clapper, F.R., J. Opt. Soc. Amer., 43, 595 (1953).

[1] Иногда как «diffuse/8» («d/8») и «8/diffuse» («8/d»), поскольку «нормальное» направление на самом деле составляет примерно 8° к нормали (дабы избежать переотражения внутри самого измерительного прибора).

14 СЕНСИТОМЕТРИЯ И ДЕНСИТОМЕТРИЯ

14.1 ВВЕДЕНИЕ

Многие цветные фотопленки нормально экспонируются без каких-либо специальных замеров уровня и характера освещения сцен. Но даже если такие замеры выполняются, они часто сводятся к измерению интегральной величины интенсивности света, отраженного от объектов сцены (либо падающего на них).

Оценка *изображений* зафиксированных сцен также чаще всего проводится без какого-либо специального аппаратного контроля.

Однако даже в любительской цветной фотографии инструментальные измерения крайне важны, и, несмотря на то, что порой они скрыты от глаз пользователя, эти измерения закладывают основу успешной работы цветофотографической системы. В частности, при печати финального изображения на отражающем носителе, аппаратный контроль коэффициента пропускания негатива, промежуточного негатива или слайда, с которых делался отпечаток, представляет собой критично важный этап нецифрового цветорепродукционного процесса (см. гл. 16).

Даже когда речь идет о слайдах (т.е. изображениях, полученных без всякой промежуточной технологической стадии), производитель обращаемой фотопленки выполняет серию контрольных замеров на отрезках от основных партий фотоматериалов, а условия, в которых идет их обработка, — предмет дальнейших масштабных инструментальных измерений.

В профессиональной фотографии выполняются тщательные и развернутые светотехнические измерения сцен, включающие в себя, к примеру, определение средней фотометрической яркости белых объектов (или их максимальных и минимальных яркостей) наряду с измерением средней фотометрической яркости сцены (или вместо него).

Когда в цветорепродукционном процессе присутствуют дополнительные стадии, задействующие черно-белые сепарации, промежуточные негативы и/или маски (см. гл. 15), инструментальный контроль также необходим.

Когда в иные системы визуализации изображений (например, в телевизионную систему или процесс полутоновой печати) включена фотографическая стадия, то на испытательном и отладочном этапах выполнение измерений строго обязательно, в противном случае практически невозможно получить четкое представление о вкладе каждого технологического звена в достоинства или недостатки конечного результата (и непонятно где, что и как нужно изменить, чтобы улучшить результат).

Наконец, в ряде научных и технических исследований количественная оценка природных явлений требует высокоточной цветной фотографии.

Таким образом, налицо ряд причин, по которым мы обязаны детально разобраться в науке о фотографических измерениях, в частности в контексте цветофотографических процессов.

14.1.1 Сенситометрия

Процесс измерения чувствительности фотоматериалов носит название процесса *сенситометрии*. Сенситометрия, выполняемая в *абсолютных* показателях, — это прерогатива производителей фотоматериалов — специалистов, для которых актуален вопрос светочувствительности фотопленок и фотобумаг; однако в большинстве пользовательских случаев интерес представляют *относительные* данные и поэтому используются упрощенные схемы измерений.

Сенситометрия проводится на трех главных этапах фоторепродукционного процесса: на стадиях экспонирования, обработки и оценки результата. Однако для получения стабильных и предсказуемых визуальных результатов помимо сенситометрии необходим строгий контроль технических параметров цветорепродукционного процесса на всех его этапах, в частности, контроль денситометрический. При этом очень важно, чтобы параметры эти соответствовали типичным условиям целевого применения данного материала, потому как в противном случае сенситометрические данные могут оказаться неверными, а конечный результат — неудовлетворительным.

14.1.2 Денситометрия

Процесс определения точности фоторегистрации, выполненный на основе сенситометрических данных, носит название процесса *денситометрии*, поскольку, как видно из самого термина, речь идет об измерении *оптических плотностей*. Напомним, что:

⇨ *Оптическая плотность* — это $\mathrm{Lg}(100/T)$, где T — коэффициент отражения или пропускания данного участка материала в %.

14.2 СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

С целью диагностики абсолютной светочувствительности материала (либо его относительной калибровки при том или ином специфическом применении) материал этот подвергается т.н. *сенситометрическому экспонированию*, при котором на эмульсию подается свет в строго заданном количестве.

Поскольку фотометрические яркости объектов реальных сцен очень трудно удержать на постоянном уровне, в практической сенситометрии применяются специальные искусственные «изображения», реже — специальные черно-белые или цветные изображения естественных сцен.

Если в качестве тестового изображения используется слайд, то его можно отпечатать на тестируемом материале простым контактным способом (при освещении равномерным строго контролируемым светом). Если же формат тестируемого материала сильно отличен от формата тест-изображения, должна применяться проекционная система, и тест-изображение в этом случае можно выполнить как на отражающем носителе (отпечаток), так и на прозрачном (слайд). Однако же слайды используют чаще, поскольку, во-первых, диапазон их оптических плотностей (тоновый диапазон) существенно больше, чем у отпечатков, а во-вторых их проще хранить в идеальной чистоте.

Аппараты, экспонирующие тестируемые фотоматериалы в сенситометрических целях, называются *сенситометрическими фотокамерами* и могут использоваться по-разному, например, с помощью сенситометрической камеры можно оценить зернистость и резкость фотоматериала, сильно уменьшив размер тестового изображения на тестируемом материале, а затем выполнив увеличение полученной копии, или же с по-

мощью сенситометрического аппарата можно изготовить целый тираж тестовых изображений, серийно экспонировав необходимый фотоматериал.

14.3 СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ КЛИНЬЯ

Серьезными недостатками фотореалистичных изображений, выступающих в роли изображений тестовых, являются:

— трудность в отыскании участка, подходящего для измерений;

— неизбежное виньетирование оптики и паразитная подсветка проекционных систем (снижающие точность калибровки этих систем).

Стоит отметить, что виньетирование и паразитную подсветку можно учесть, если выполнить непосредственную фотометрию тестового изображения с должной точностью (что, к сожалению, не всегда возможно).

По этим причинам в сенситометрических целях обычно используются весьма упрощенные «сцены», состоящие либо из дискретных, либо из непрерывных тоновых клиньев. Эти клинья представляют собой узкие полосы прозрачного материала, коэффициент пропускания которого либо дискретно, либо плавно меняется в некоем заданном режиме по всей длине полосы (т.н. *сенситометрические стрипы*).

Сенситометрический стрип контактным способом экспонируется на тестируемый материал при помощи *сенситометра*. Экспозиция по каждой точке идентифицируется либо по маркировке шагов (если клин дискретный), либо по длине клина (если он непрерывный).

Для удобства сенситометрические клинья должны иметь хотя бы один патч (или участок) со строго постоянным коэффициентом пропускания по всем длинам волн видимого спектра. Иными словами, клинья должны быть изготовлены из т.н. *неселективного нейтрального материала* (отыскать который очень непросто).

По последней причине в некоторых сенситометрах вместо клиньев используются вращающиеся барабаны, которые от участка к участку тестового стрипа меняют не интенсивность освещения, а время экспозиции. Однако нельзя сказать, что в фотографии изменение времени экспозиции и изменение интенсивности света равноценны (т.н. явление *невзаимозаместимости* или эффект Шварцшильда), поэтому варьирование временем экспозиции (выдержкой) подходит, как правило, получению лишь относительных данных, пригодных, к примеру, при оценке согласованности звеньев цветорепродукционной цепочки.

В основной работе необходимы неселективные спектрально равномерные (нейтральные) клинья, которые на массовом рынке встречаются в виде серебряных черно-белых — либо коллоидно-графитовых (карбоновых) стрипов, либо же стрипов, изготовленных на основе т.н. *инконеля* — никелевого напыления на стекле или кварце. Отметим, что на производстве должна проводиться тщательная проверка готовых клиньев на равномерность пропускания по видимому спектру, поскольку т.н. *преимущественное рассеяние* на определенных длинах волн может заметно окрасить тест-стрип.

Коллоидно-графитовые стрипы, как правило, изготавливаются на основе дисперсии графита в желатине. Если размер графитовых частиц достаточно мал, клин приобретает коричневый оттенок, который приходится компенсировать добавкой синего красителя. По данному принципу, в частности, изготовлены нейтральные фильтры Kodak Wratten.

Если взять графит более крупного помола (т.н. графит М-типа), то можно добиться

большей спектральной равномерности клина, но возникающее при этом весьма заметное светорассеяние несколько сужает область использования инструмента.

Инконелевые клинья почти идеально равномерны по спектру, но очень дороги и вдобавок имеют выраженный зеркальный компонент отражения, от которого приходится избавляться тем или иным образом (Eastman Kodak Co, 1970).

Отметим, что размер патчей на шаговом клине — исключительно вопрос удобства, но стоит сказать, что по очень мелким шагам трудно оценивать результат, плюс к тому, на мелких образцах возникает т.н. *эффект локального истощения проявителя* (*краевой эффект*). Чаще всего используются патчи, размер которых либо постоянен по всей протяженности клина (длиной 0.4", или 10 мм), либо плавно растет. Оптимальное приращение коэффициента пропускания по шагам, как правило, пропорционально $\sqrt{2}$, то есть экспозиция тестируемого материала через патч удваивается или, наоборот, — вдвое уменьшается.

14.4 РАВНОМЕРНОСТЬ ОСВЕЩЕНИЯ

Виньетирование в объективе сенситометрической камеры, уменьшающее интенсивность освещения по краям тестового изображения, может привести к неравномерности экспозиции тестируемого материала. Однако с помощью сенситометров контактного типа можно добиться идеально равномерной освещенности тестового изображения (или сенситометрического клина), невзирая при этом на неизбежные остаточные неравномерности. Сие возможно при условии, что девиация равномерности осветителя не превышает ±1%.

Когда речь идет о единичном источнике, размер которого настолько мал, что этот источник можно считать точечным, то для обеспечения должной равномерности его следует удалить от сенситометрического клина на 4.5 длины последнего. Таким образом, если клин состоит из 21 патча длиной в 0.4" (10 мм), общая длина стрипа будет составлять 8.4" (21 см), и, соответственно, расстояние до лампы должно быть порядка 40" (100 см).

Однако в свое время было показано, что если используются два точечных источника, то необходимой равномерности (и даже с запасом) можно добиться при меньшем удалении от тестового изображения. С двумя лампами равномерность в ±1% достигается уже с расстояния в 1.18 длины того же восьмидюймового тест-стрипа, т.е. порядка 10" (25 см) от его плоскости. В данном случае (см. рис. 14.1) лампы должны быть расположены на одинаковом удалении от центра сенситометрического клина и разнесены друг от друга на расстояние, равное 1.05 его длины (Marriage, 1955).

Отметим, что двухламповый сенситометр ощутимо компактнее однолампового, свет его равномернее, но при этом имеет место единственная проблема, которая состоит в несинхронном старении ламп. Последнее ведет к снижению равномерности освещения по мере эксплуатации прибора, однако поскольку источники в двухламповом сенситометре расположены гораздо ближе к клину, чем в одноламповом, — освещенность фотоматериала намного выше, и, следовательно, лампы могут работать с неполной нагрузкой (благодаря чему можно всерьез увеличить срок их службы).

14.5 ВЫДЕРЖКА

Время экспозиции фотоматериала — *выдержка* — должно быть максимально приближено к значению, какое используется в имитируемых фактических условиях (кро-

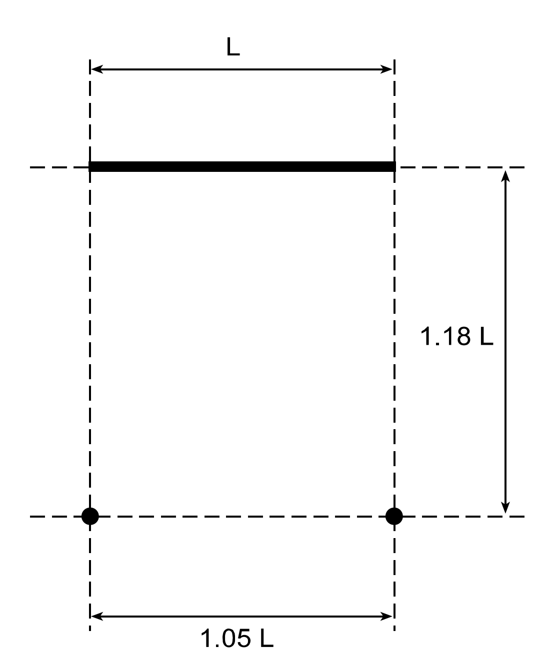


Рис. 14.1 Расположение двух «точечных» источников света, обеспечивающее равномерность освещенности сенситометрического клина длиной «L» с точностью ±1%.

ме тех случаев, когда заранее известно, что различия в выдержке не вызовут упомянутого выше эффекта невзаимозаместимости или если его возникновение в данном конкретном случае не принципиально).

Когда речь идет о фотоувеличении (фотобумага), то диапазон выдержек лежит в пределах от 1 до 30 с, для чего весьма подходящими являются электронные таймеры, управляющие временем горения лампы увеличителя. Безусловно, лампы должны работать при постоянном напряжении, для чего применяются стабилизаторы.

У фотопленок диапазон рабочих выдержек ощутимо короче и лежит в пределах от 1/50 до 1/500 с, для чего используются специальные затворы. При этом освещенность пленки должна быть намного выше, чем у фотобумаг.

Одной из наиболее удобных конструкций пленочного сенситометра является тот ее вариант, при котором единичная лампа освещает узкую щель, равномерно движущуюся вдоль сенситометрического клина; щель позволяет достигать очень коротких выдержек, а малое расстояние от лампы до поверхности пленки — высокого уровня освещенности последней.

Выдержки диапазона от 1/1000 до 1/10000 с на практике реализуются обычно с помощью электронных фотовспышек — в этих случаях затворы не используются, но должен проводиться тщательный контроль соответствия вспышек их сенситометрическому назначению.

14.6 ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Благодаря высокой стабильности работы и простоте управления, самым подходящим сенситометрическим источником света являются лампы накаливания (за исключением ситуаций, при которых необходимы сверхкороткие выдержки).

Если в имитируемой ситуации используются лампы накаливания, то понятно, что

они же желательны и в сенситометре, поскольку спектральное распределение энергии света этих ламп будет полностью адекватным сенситометрическим задачам.

Если в реальной ситуации использован дневной свет, то свет вольфрамовых ламп сенситометра приходится фильтровать, имитируя спектральное распределение дневного света (что удобнее всего делать с помощью синего стекла марки «Corning 5900» [см. рис. 14.2]) .

Дабы уменьшить количества т.н. дальнего красного света и инфракрасного излучения, которые в изобилии испускаются лампой накаливания (см. рис. 14.2) и недостаточно поглощаются синим фильтром, в конструкцию сенситометра желательно добавить т.н. эндотермическое (теплопоглощающее) стекло.

Использование желатиновых фильтров в сенситометрах нежелательно, поскольку при мощном свете их поведение нестабильно. Стоит отметить, что некоторые стекла при нагреве ощутимо меняют свой спектральный коэффициент пропускания, что в сенситометрии неприемлемо.

14.7 СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ

Из-за поглощения света стеклом, а также из-за наличия антибликовых покрытий у линз спектральный коэффициент пропускания фотообъективов неоднороден по всему видимому спектру, и, к сожалению, влияние этого фактора на спектральный состав света, экспонирующего фотоматериал, весьма велико (Williams и Grum, 1960). Поэтому в конструкции сенситометров чаще всего предусматриваются специальные фильтры.

14.8 ПОСЛОЙНАЯ (СЕЛЕКТИВНАЯ) ЭКСПОЗИЦИЯ

Раздельной (селективной) экспозиции слоев фотоматериала, как правило, добиваются с помощью т.н. *селективных светофильтров* (т.е. фильтров с узкими границами пропускания по «красной», «зеленой» или «синей» областям видимого спектра). Однако максимум полезной информации удается получить, когда фотоматериал экспонируется через окрашенные стрипы: вначале через каждый стрип отдельно, с целью получения окрашенных клиньев на тестируемом материале, а затем (в определенной пропорции) — вместе, для получения серого клина. Отметим, что данная методика удобна при оценке характера и степени т.н. *межслойных эффектов* (см. раздел 15.5).

14.9 ИЗМЕНЕНИЯ В СКРЫТОМ ИЗОБРАЖЕНИИ

В сенситометрии имеет место фактор, о котором всегда должно помнить, — это возникающие со временем естественные изменения в скрытом изображении. Нельзя сказать, что эти изменения очень велики, но проявляют они себя неравномерно: после сравнительно долгого периода плавной динамики происходит резкий скачок (два-три дня).

Чтобы получать максимально точные сенситометрические данные рекомендуется обрабатывать фотоматериал либо в течение одного-двух часов после экспонирования, либо по прошествии нескольких дней, необходимых для т.н. *выстаривания* скрытого изображения при комнатной температуре (при условии, что до экспонирования материал хранился на холоде).

Первый вариант подходит большинству ситуаций, однако второй удобен при одно-

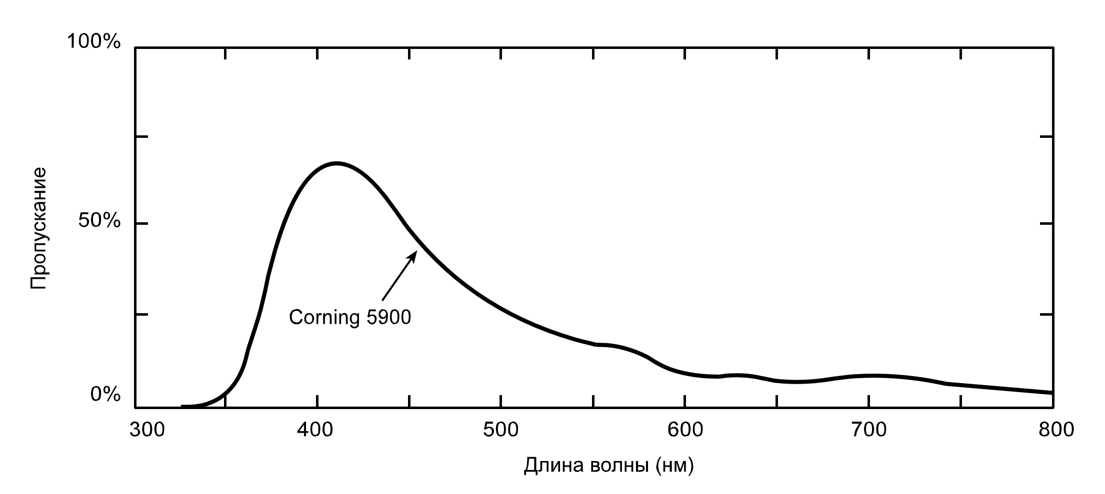


Рис. 14.2 Кривая спектрального коэффициента пропускания синего стекла марки «Corning 5900», используемого для имитации дневного света при лампах накаливания.

временном экспонировании большого числа стрипов в расчете на их постепенное использование (с целью регулярного контроля работы фотографической системы).

14.10 КОНТРОЛЬ ОБРАБОТКИ ФОТОМАТЕРИАЛОВ

Поскольку химическая обработка фотоматериала — это весьма вариабельный этап цветофотографического процесса, необходимо принимать определенные меры предосторожности (при этом меры эти не должны увести процесс в сторону от процесса фактического).

Факторами, влияющими на стабильность процесса обработки, являются:

— химический состав растворов (наиболее тщательного контроля обычно требуют проявители);

— температура растворов;

— время пребывания материала в каждой ванне;

— характер перемешивания раствора у поверхности фотоматериала.

14.10.1 Контроль химического состава растворов

В результате химического взаимодействия фотоматериала с компонентами фоторастворов химический состав этих растворов несколько меняется (т.н. *созревание*). Таким образом, один из путей стандартизации химии фотографических ванн — это приготовление их из химически чистых ингредиентов или же применение т.н. *освежающих добавок* (*пополнителей*). Однако всегда нужно помнить, что в последнем случае, несмотря на добротный состав рабочих ванн, сам процесс будет отличаться от стандартного, если состав этот не прошел созревание.

В целях стандартизации химического состава обрабатывающих ванн, разумеется, вполне применим собственно химический контроль, но он дорог и не может защитить от всех вариаций параметров процесса. Вместе с тем удовлетворительных результатов можно добиться, если своевременно выявлять все отклонения от номинала, при первой возможности «прогоняя стрип» из *контрольного* фотоматериала, сходного по свойствам с материалом тестируемым (Koerner, 1954).

14.10.2 Контроль времени обработки и температуры растворов

Контроль времени пребывания фотоматериала в растворе и температуры последнего не представляют какой-либо серьезной технической трудности, а тщательность и аккуратность в отслеживании этих факторов полностью себя оправдывают.

14.10.3 Перемешивание растворов

Перемешивание раствора у поверхности фотоматериала радикально влияет на скорость обмена между отработанными компонентами фотораствора и его свежими порциями (что, в свою очередь, влияет на скорость химических реакций, особенно в проявителях). Имитация фактических режимов перемешивания с помощью специальных сенситометрических машин — вещь крайне затруднительная, поэтому обрабатывать контрольный фотоматериал предпочтительно в реальных условиях.

Наиболее широко распространенными методами перемешивания являются:

— помповая рециркуляция;

— перемешивание пузырьками газа, выбрасываемыми из дна танка каждые несколько секунд и стремительно взлетающими к поверхности раствора (в проявителях чаще всего используют азот, поскольку в отношении них он химически интактен);

— распыление растворов на фотоматериал из специальных сопел (последние движутся вдоль поверхности материала в виде барабанов, валиков, крыльчаток, щеток и т.п.);

— выемка фотоматериала из раствора (и его сток с поверхности), выполняемая с определенным интервалом (метод применим только к листам фотобумаги, фотопластинам и коротким отрезкам пленки, но не к кинопленкам или фотопленкам, склеенным в непрерывную ленту);

— вибрация фотокюветы (при обработке отдельных листов фотобумаги или фотопластин следует избегать образования волнового «муара» на поверхности раствора).

Наконец, от перемешивания вообще можно уйти за счет нанесения обрабатывающих растворов на поверхность фотоматериала в виде клейкой массы (Edgecombe и Seeley, 1963).

14.10.4 Контрольные стрипы

Когда краскообразующие компоненты находятся в растворах, а не в слоях фотоматериала (*Kodachrome*), имитация процесса его обработки крайне затруднена. В таких случаях обрабатывается несколько экземпляров стрипов, а результат измерений усредняется. Еще один вариант возможных действий: вместе с фактическим фотоматериалом проявляется т.н. *контрольный стрип*, отпечатанный на пленке с конкретными строго заданными свойствами.

Хотя обе схемы нетехнологичны и неудобны, они гарантируют, что режим обработки сенситометрического стрипа будет идентичен фактическому режиму обработки фотоматериала, поскольку им и является.

Вместе с тем применение контрольных стрипов чревато определенными сложностями:

— во-первых, фотоматериал, на котором отпечатана серия таких стрипов, должен быть химически равномерным на всем своем протяжении, то есть стрипы должны поступать с одного рулона одной партии;

—во-вторых, коль скоро чувствительность фотоматериалов слегка меняется со вре-

менем, рулон с контрольными стрипами не может оставаться химически инвариантым в течение длительного срока. Однако если хранить стрипы при низкой температуре, то можно существенно повысить их стабильность. Отметим, что для особо важных работ используются температуры хранения чуть ниже нуля по Фаренгейту (−18° С), при этом перед распаковкой рулон прогревают до комнатной температуры (в противном случае вдобавок к температурным вариациям по разным участкам материала, на его поверхностях может образоваться конденсат);

— в-третьих, контрольный стрип может указать на то, что процесс стабилен, когда система содержит в себе т.н. *взаимокомпенсирующие дефекты*. Поясним: к примеру, когда проявитель истощен, но при этом нагрет до высокой температуры — тестируемый материал может не дать того же результата, что в стандартных условиях, хотя контрольный материал наверняка покажет, что все в порядке. Дабы при обработке фотоматериалов уйти от взаимовлияний разных факторов, даже при наличии контрольных стрипов необходимо безукоризненное соблюдение предписанных параметров самоего процесса (а для особо важных работ требуется серия тестов с последующим усреднением результатов).

Из вышесказанного напрашивается вывод о том, что полноценный контроль обработки фотоматериалов вообще нереализуем на практике. Безусловно, достижение высокой точности процессов требует очень больших усилий, к примеру, производители фотоматериалов и фотолаборатории промышленного уровня всегда задействуют как развернутый химический анализ растворов, так и их регулярный и тщательный стрип-контроль. Вместе с тем мера тщательности стрип-контроля определяется как уровнем производственной задачи, так и элементарным здравым смыслом, поэтому в определенных ситуациях даже при не очень регулярной и не скрупулезно выполняемой сенситометрии можно добиваться приемлемых результатов основного технологического процесса.

Когда фотоматериал используется для высокоточной регистрации сцены, к примеру, предполагающей дальнейшую колориметрию, то предпочтительным будет использование не отдельных контрольных стрипов, а сенситометрических клиньев (или иных подходящих образцов) — их экспонируют на свободный участок рабочего фотоматериала (когда речь идет о листовых материалах, то под сенситометрические клинья отводят 2-3 листа).

Наконец отметим, что сенситометрический клин и/или карту цветовых образцов иногда удается разместить прямо в регистрируемой сцене — но в этом случае приходится вводить поправку на виньетирование в объективе камеры и неравномерность освещенности карты и клина.

14.11 ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА

Оценить качество обработки фотоматериала можно разными способами, некоторые из которых весьма сложны, однако простейший способ — визуальную оценку — ни в коем случае нельзя отвергать, поскольку зрение — это великолепный детектор *различий* в пропускательной или отражательной способностях материалов (даже несмотря на его природную неточность в оценках абсолютных).

Таким образом, наиболее важные отличия между тестируемым материалом и материалом контрольным можно с легкостью выявить визуально (если только речь не идет об отличиях между синими объектами на низких уровнях их фотометрической яркости, где зрение менее чувствительно). Визуальный контроль также незаменим при вы-

явлении грязи и царапин на обработанном фотоматериале. Наконец, на визуальный контроль обычно (но не всегда) полагаются как на удобный способ сравнения результатов цветовоспроизведения, выполненного принципиально разными технологическими методами.

14.12 ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ШКАЛЫ

В разделе 14.3, посвященном сенситометрическим клиньям, было показано, что коэффициент пропускания патчей дискретного клина обычно меняется с неким постоянным коэффициентом пропорции (например: 4, 8, 16, 32, 64 и т.п.), но непостоянными арифметическими приращениями (4, 19, 34, 49, 64 и т.п.). Сие продиктовано следующим двояким соображением:

— во-первых, клин с пропорциональным ростом (или снижением) коэффициентов пропускания воспринимается зрением как несколько более равномерный, нежели клин с арифметической последовательностью этих показателей;

— во-вторых, когда возникают какие-либо отклонения от нормального уровня экспозиции фотоматериала (к примеру, из-за экспонометрических ошибок), все уровни освещенности фотоматериала под клином умножаются на некий общий коэффициент, что соответствует определенному экспозиционному сдвигу по всем объектам сцены, выраженному в количестве шагов клина.

Таким образом, оценка сенситометрических данных в показателях приращения десятичного логарифма экспозиции ($\mathrm{Lg}H$) вместо показателей приращения самоей экспозиции (H) давно стала общей практикой сенситометрии. По тем же причинам вместо самих коэффициентов пропускания (T) или отражения (R) фотографических материалов применяется их десятичный логарифм, однако в данном случае используется не $\mathrm{Lg}T$, а показатель оптической плотности на пропускание, которая, еще раз напомним, определена как $\mathrm{Lg}(100/T)$, где T — коэффициент отражения или пропускания, выраженный в %.

Коль скоро основание логарифма равно 10 — отличие в логарифме экспозиции на 1 будет соответствовать десятикратному изменению экспозиции или, к примеру, оптическая плотность 2.0 будет эквивалентной коэффициенту пропускания 1%.

Если по оси ординат отложить оптические плотности (D) элементов изображения, а по оси абсцисс — десятичный логарифм экспозиции ($\mathrm{Lg}\ H$), то полученная кривая будет представлять собой т.н. *тон-репродукционную характеристику* фотоснимка и именоваться его *характеристической кривой* (см. раздел 6.3). Отметим, что «H» и «D» — это первые литеры фамилий Hurter и Driffield (Хартер и Дриффилд) — ученых, впервые применивших такую кривую.

Общий наклон характеристической кривой косвенно указывает на визуальную контрастность изображения, а тангенс угла наклона касательной к относительно линейному участку этой кривой именуется *гамма* (γ) или *коэффициентом контрастности*.

В системах, задействующих больше одного фотоматериала, общая гамма системы примерно равна произведению величин гамма каждой из составляющих этой системы, однако точное значение результирующего коэффициента контрастности зависит в том числе от величин паразитной подсветки и светорассеяния.

Наконец, отметим, что тангенс наклона касательной к той или иной точке характеристической кривой именуется *точечной гамма* или *дифференциальным значением коэффициента контрастности*, но обычно сокращается просто до «гамма».

14.13 ДЕНСИТОМЕТРИЯ

Нельзя не сказать, что для создания инструментов измерения оптической плотности понадобилась незаурядная изобретательность инженеров: было предложено множество разных конструкций, которые в итоге разделились на три основных группы:

— простые визуальные денситометры (рис. 14.3 [a]) ;

— фотоэлектрические денситометры подстановочного типа (рис. 14.3 [b]) ;

— фотоэлектрические денситометры прямого измерения (рис. 14.3 [c]) .

14.13.1 Визуальные денситометры

В визуальном денситометре лучи от лампы «на просвет» и лампы сравнения (при измерении оптической плотности на отражение используются две лампы «на отражение») организованы так, чтобы освещать каждое из т.н. *полей уравнивания*: образец размещают в световом потоке одной из ламп; в потоке другой лампы расположен непрерывный нейтральный клин, позицию которого меняют до визуального уравнивания полей сравнения. Оптическую плотность определяют по шкале, нанесенной на этот клин.

Согласование интенсивностей световых потоков обеих ламп выполняется за счет изменения дистанции последних до полей сравнения; перед началом измерений добиваются того, чтобы образец с оптической плотностью, принятой за нулевую, визуально уравнялся с позицией нулевой оптической плотности клина (т.н. *обнуление* денситометра).

Когда речь идет об измерениях отражающих образцов, то для обнуления прибора теоретически должен использоваться «идеальный» рассеиватель — поверхность с напылением оксида магния, оксида бария или карбоната магния — порошков, хорошо аппроксимирующих идеальный отражающий рассеиватель. Однако из-за химической нестойкости этих веществ используются специально калиброванные образцы белой керамики.

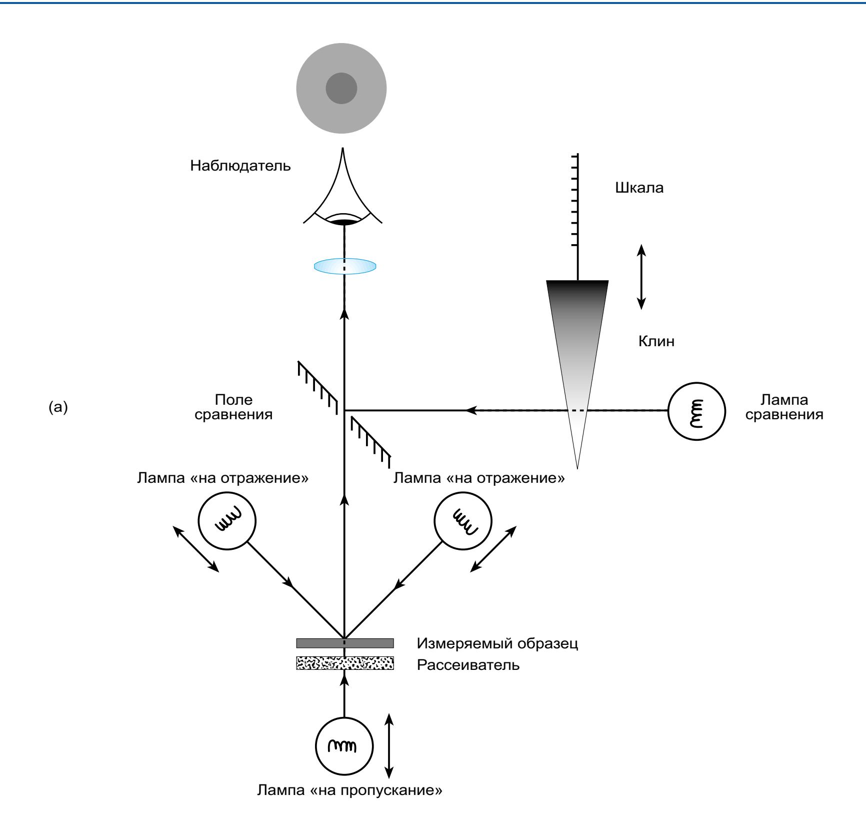
Визуальные денситометры просты в устройстве, весьма дешевы, не содержат в себе легко ломких деталей, однако обладают тремя недостатками:

— во-первых, процесс визуального уравнивания очень утомителен, человек быстро устает;

— во-вторых, процесс измерения занимает много времени, и когда нужно оценить большое количество образцов, процедура растягивается на многие часы;

— в-третьих, точность измерений подчас оказывается ниже необходимой — по рис. 14.3 (a) хорошо видно, что чем выше оптическая плотность измеряемого образца, тем ниже фотометрическая яркость полей сравнения и, следовательно, тем ниже точность уравнивания.

Для того чтобы работать при постоянной фотометрической яркости существует лишь один путь: поместить клин в то же поле, в котором находится образец, и, манипулируя этим клином, визуально уравнять исследуемый образец с неким эталонным образцом высокой оптической плотности, находящимся в другом поле. Однако такая процедура требует очень высокой мощности света, поэтому на малых оптических плотностях будут возникать примерно такие же погрешности, что при малой освещенности на высоких оптических плотностях.



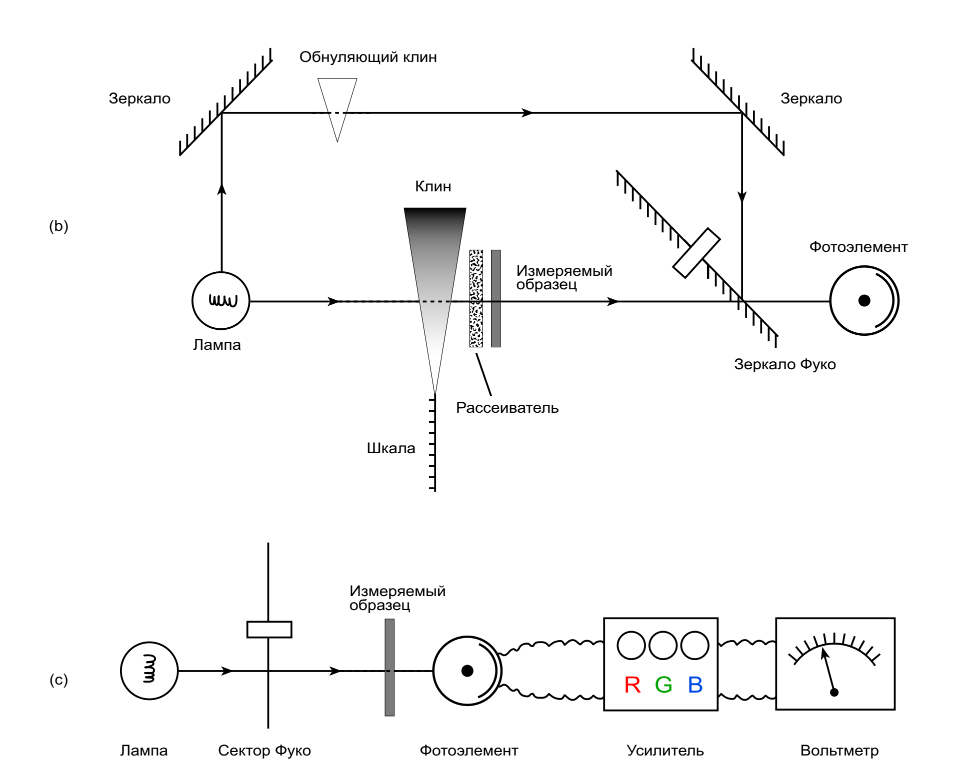


Рис. 14.3 Принципиальне схемы устройства денситометров: (a) — визуальный денситометр; (b) — денситометр подстановочного типа; (c) — денситометр прямого измерения.

14.13.2 Фотоэлектрические денситометры подстановочного типа

Когда при измерении оптических плотностей в роли «наблюдателя» выступает фотоэлектрический датчик (фотоэлемент) — точность таких измерений существенно выше, чем точность измерений визуальных.

Общая схема фотоэлектрического денситометра показана на рис. 14.3 (b): первый световой поток идет от лампы сквозь сенситометрический клин, а затем, через измеряемый образец — на фотоэлемент; второй световой поток (от той же лампы) идет на фотоэлемент, проходя вначале через обнуляющий клин (который используется как для обнуления прибора, так и для уравнивания с оптической плотностью связки «клин — образец»), а затем через вращающийся зеркальный обтюратор (зеркало Фуко), периодически отсекающий первый поток.

Когда освещенность фотоэлемента первым потоком отлична от освещенности вторым потоком, то, коль скоро обтюратор вращается, текущее отличие освещенностей фиксируется импульсным сигналом. Когда освещенности фотоэлемента уравниваются — импульсы исчезают. Позиция клина меняется либо вручную, либо при помощи сервомотора до пропадания импульсного сигнала, после чего оптическая плотность образца считывается по разметке клина (Hercock и Sheldrick, 1956; Neale, 1956; Harvey, 1956).

Фотоэлектрические денситометры просты в обращении, работают быстро и дают высокоточные результаты, однако, безусловно, эти приборы сложнее и дороже денситометров визуальных. Точность показаний фотоэлектрических денситометров, также как и у визуальных приборов, зависит от точности калибровки и постоянства характеристик измерительных клиньев.

14.13.3 Фотоэлектрические денситометры прямого измерения

Фотоэлектрический денситометр прямого измерения — это очень простой прибор (рис. 14.3 [c]), в котором свет лампы подается на фотоэлемент, проходя при этом через измеряемый образец; выходной сигнал фотоэлемента усиливается и измеряется вольтметром. Прибор можно дополнить блоком, за счет которого фотоэлемент будет выдавать постоянный сигнал (постоянный сигнал легче усилить, чем сигнал переменный). Для получения линейной шкалы оптических плотностей (а не коэффициентов пропускания) нужно, чтобы сам прибор (либо усилитель) логарифмировал выходной сигнал.

Денситометры прямого измерения весьма практичны в работе с цветными фотоматериалами, поскольку позволяют выставлять нули для одновременной работы через красный (R), зеленый (G) и синий (B) фильтры, что очень удобно, поскольку дает возможность одновременно регистрировать т.н. *зональные оптические плотности*, то есть выполнять измерение, не сдвигая при этом прибор с измерительной позиции на исследуемом материале. (Обнуление также может выполняться через апертуры с вмонтированными в них красным, зеленым и синим фильтрами).

Точность показаний денситометров прямого измерения, к сожалению, зависит от характеристик усилителя и вольтметра, но безусловным достоинством этих приборов является возможность одновременного зонального замера (в то время как в приборах, задействующих клинья, любое легкое отклонение от спектральной равномерности клина даст при зональных измерениях ощутимый разброс данных).

К фотоэлектрическим денситометрам прямого измерения относится большинство выпускаемых сегодня промышленных денситометров. Некоторые приборы могут фик-

сировать оба вида оптических плотностей (то есть как на пропускание, так и на отражение), другие сконструированы в расчете только на какой-либо один вид измерений.

14.14 ЗЕРКАЛЬНАЯ И ДИФФУЗНАЯ ОПТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ НА ПРОПУСКАНИЕ

Оптические плотности черно-белых серебряных фотоматериалов определяются и поглощающими, и светорассеивающими свойствами серебра, следовательно, значения оптических плотностей при измерении этих материалов будут зависеть как от геометрии освещения, так и от геометрии измерения (Powell, 1956). На рис. 14.4 дан ряд практических ситуаций, иллюстрирующих сказанное.

14.14.1 Зеркальная оптическая плотность

Рис. 14.4 (a) демонстрирует вариант фотоувеличения без какого-либо светорассеяния: бо́льшая часть рассеянного пленкой света не попадет на фотоэлемент прибора, поэтому оптические плотности элементов изображения будут максимально возможными. В этом случае мы говорим о т.н. *зеркальных оптических плотностях*.

14.14.2 Диффузная оптическая плотность

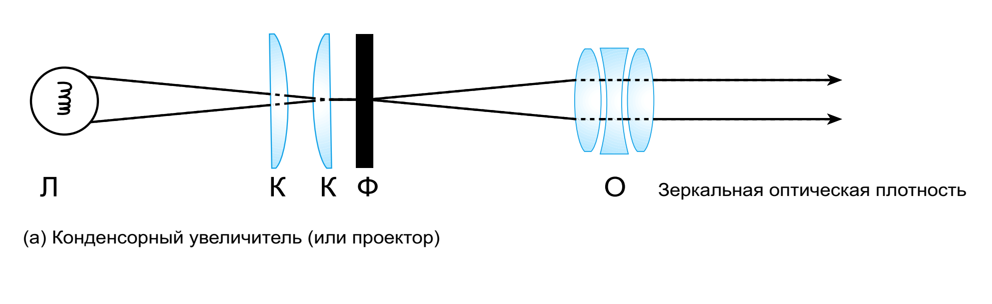
На рис. 14.4 (b) дана та же ситуация, но с добавлением в оптическую систему фотоувеличителя специального рассеивателя: часть света в этом случае идет сквозь объектив под разными углами к его оптической оси, и, следовательно, у изображения появляется паразитная подсветка, снижающая оптические плотности его элементов. Коль скоро долевое участие подсветки растет по мере роста оптической плотности элементов изображения, внутри проекционного луча не будет ни одного участка с нулевой энергией, и, следовательно, в изображении не будет ни одного элемента с зеркальной оптической плотностью. Таким образом, эффект рассеяния не только понижает оптическую плотность всех элементов изображения, но также снижает контраст этого изображения. Результирующая оптическая плотность, т.е. плотность, пониженная паразитной подсветкой вследствие светорассеяния, называется *диффузной оптической плотностью*.

На рис. 14.4 (c) дан вариант просмотра изображения на матовом стекле: коль скоро светорассеяние аналогично тому, что показано на рис. 14.4 (b), — все оптические плотности элементов изображения будут диффузными.

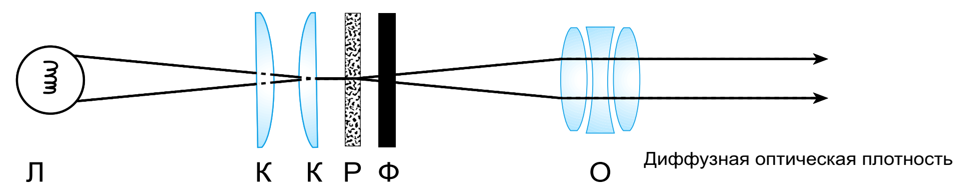
На рис. 14.4 (d) показана ситуация, в которой благодаря источнику направленного света можно ожидать, что оптические плотности элементов изображения достигнут уровня зеркальных. Однако светоприемником в данном случае выступают либо фотобумага, либо пленка контактной печати, которые, как мы знаем, переотражают и рассеивают свет в эмульсионных слоях. То есть фактически результирующие оптические плотности в *c*- и *d*-случаях будут одними и теми же диффузными оптическими плотностями.

14.14.3 Двойная диффузная оптическая плотность

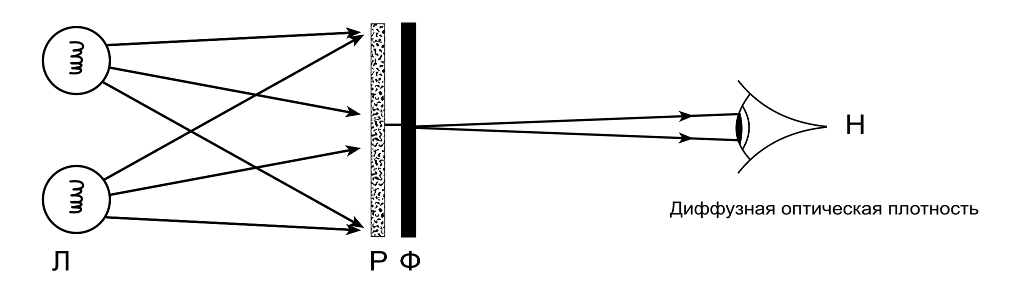
Наконец, на рис. 14.4 (e) дан вариант контактной печати при освещении оригинального изображения рассеянным светом. Коль скоро в данном случае и освещение, и фотоматериал — диффузны, результирующие оптические плотности будут чуть выше, чем



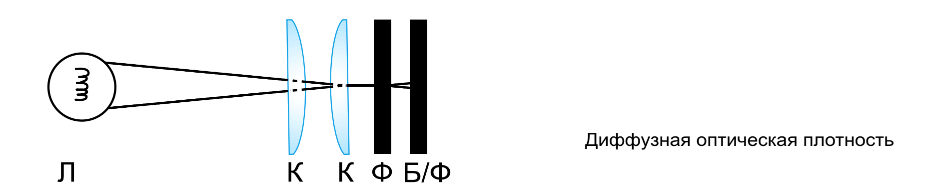
(a) Конденсорный увеличитель (или проектор)



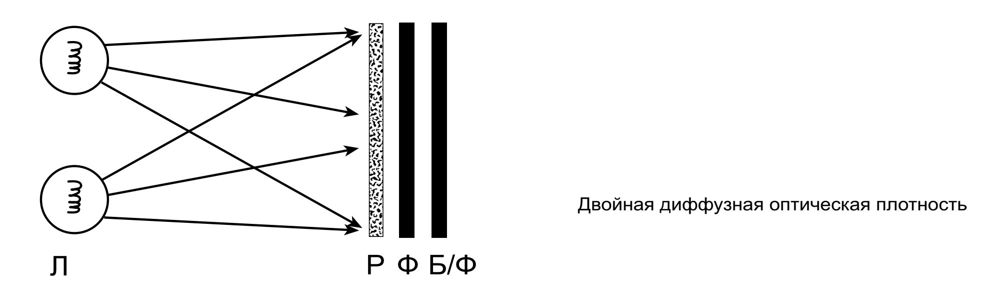
(b) Диффузный увеличитель



(c) Просмотровое устройство на просвет



(d) Контактная печать



(e) Диффузная контактная печать

Рис. 14.4 Пять типичных фотографических вариантов оптики печати/просмотра и соответствующие им виды оптических плотностей; «Л»— лампа; «К» — линзы конденсора; «Ф» — фотопленка; «О» — объектив; «Р» — рассеиватель; «Б/Ф» — фотобумага или фотопленка.

плотности диффузные, однако далеко не так высоки, как плотности зеркальные. В этом случае мы говорим о таком понятии, как *двойная диффузная оптическая плотность*.

14.14.4 Измерение зеркальной и диффузной оптических плотностей

В свое время на геометрии освещения и просмотра при зеркальной, диффузной и двойной диффузной денситометриях были приняты соответствующие стандарты (American Standards Association, 1959; ISO, 1955), однако фактические условия не могут точно соответствовать этим стандартам, поэтому, чтобы серебряные изображениями достигли максимальной репродукционной точности, необходима тщательная калибровка воспроизводящего оборудования.

В красочных фотографических (но не электрофотографических) изображениях светорассеяние в целом невелико, благодаря чему невелика и зависимость их визуального восприятия от геометрии освещения и геометрии просмотра. Поэтому при оценке оптических плотностей в цветных фотопленках вполне можно ограничиться показателем диффузной оптической плотности, причем даже тогда, когда пленки эти ориентированы на увеличение или проектирование без светорассеяния. При этом стоит напомнить, что величины реальных оптических плотностей могут оказаться чуть выше, чем измеренные величины.

На рис. 14.3 (a) и 14.3 (b) показаны схемы приборов, в которых образец освещается диффузно, а замеряется зеркально; на рис. 14.3 (c) — наоборот: освещение зеркально, замер — диффузный; то есть, в обоих случаях выполняется замер диффузной оптической плотности.

Зеркальные световые потоки денситометров обычно идут в пределах $\pm 5^{\circ}$ к оптической оси прибора. Диффузного освещения обычно добиваются с помощью матового стекла или светорассеивающего пластика, а диффузного светозахвата (рис. 14.3 [c]) — за счет установки фотоэлемента вплотную к измеряемой поверхности.

14.15 КОПИРОВАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ

14.15.1 Черно-белые бромсеребряные фотопленки

Когда фиксируются оптические плотности бромсеребряных материалов, идеальным освещением является свет, спектральное распределение энергии которого близко к таковому в практических условиях. Спектральная чувствительность фотоэлемента в данном случае также должна быть сходна со спектральной чувствительностью копировального фотоматериала (бумаги или дубль-пленки).

Однако серебряные изображения, как правило, спектрально неселективны, поэтому пользоваться можно источником почти любого спектрального распределения и датчиками любого типа. Единственным исключением является ситуация, когда желтоватое серебряное изображение печатается на несенсибилизированной фотобумаге (или пленке): в этом случае визуальные плотности фотопленки (или те, что были зарегистрированы фотоэлектрическим путем по широкой спектральной полосе) будут ниже, чем оптические плотности «с точки зрения» фотобумаги. Следовательно, в данной ситуации должен применяться детектор, спектральная чувствительность которого аппроксимирует спектральную чувствительность фотобумаги (точнее, того материала, который чувствителен только к волнам короткой и ультракороткой частей спектра — т.е. «синей» и «ультрафиолетовой»). Оптические плотности, измеренные таким путем, будут имено-

ваться «*копировальными оптическими плотностями*» или «*актиническими оптическими плотностями*».

14.15.2 Цветные фотопленки

Когда измеряются оптические плотности цветных фотопленок, предназначенных к печати на других цветных пленках или бумагах, то вновь говорят о копировальных оптических плотностях. Коль скоро слои цветного фотоматериала имеют разную спектральную чувствительность, то выполняются *три* замера, а не один.

Простейшим является замер оптических плотностей за тремя зональными фильтрами (то есть фильтрами с разными спектральными коэффициентами пропускания), которые в связке со спектральной чувствительностью фотоэлемента имитируют эффективные спектральные чувствительности слоев фотобумаги. Точное соответствие чувствительности по всем длинам волн получить почти невозможно, однако на практике оно и не требуется: главное, чтобы послойные коэффициенты контрастности (три величины гамма), измеренные денситометром, были аналогичны таковым «с точки зрения» фотобумаги или дубль-пленки.

Денситометры, как правило, имеют калибровочные настройки, позволяющие слегка корректировать результирующие значения поканальных гамма, что можно с успехом применять для компенсации погрешностей зональных гамма-измерений по разным комплектам красителей. Однако пользование этими регулировками становится хлопотным и неудобным, когда в одном сеансе измерений участвуют материалы с разными комплектами красителей.

Исходя из этих и некоторых других соображений на практике должны использоваться денситометры со стандартными величинами т.н. *спектрального произведения*.

⇨ *Спектральное произведение* (P) — это произведение спектрального распределения энергии потока излучения (S) (падающего на исследуемый образец и измеренного с шагом в 10 нм) и величины относительного спектрального отклика фотоприемника (s); то есть: $P = S \cdot s$.

14.15.3 Status M

Спектральное произведение, рекомендованное для измерений копировальных оптических плотностей, носит название *Status M* (см. таблицу 14.1 — P_{MB}, P_{MG}, P_{MR}; а также рис. 14.6) (ISO, 1984). Отметим, что раньше в стандарте были прописаны характеристики лишь Status M- и Status MM-фильтров (Miller и Powers, 1963; Dawson и Voglesong, 1973).

Следует подчеркнуть, что спектральное распределение энергии потока излучения, падающего на образец, — это функция от спектрального распределения энергии света лампы денситометра и спектральных коэффициентов пропускания (или отражения) его оптической системы, включая фильтры. Учет сего факта необходим, в частности, для спецификации ультрафиолетовых и инфракрасных свойств осветителя, т.к. исследуемый образец может оказаться люминесцирующим и занизить величины измеряемых оптических плотностей.

Низкие цифры оптических плотностей могут также стать следствием применения фотоэлемента с повышенной чувствительностью к излучению инфракрасной части спектра, волны которого свободно проходят как сквозь фотографические красители, так и сквозь вещества, из которых состоят зональные фильтры прибора.

ТАБЛИЦА 14.1
ISO-стандартные спектральные распределения энергии денситометрических осветителей (S) и ISO-стандартные десятичные логарифмы денситометрических спектральных произведений (P)

Длина волны (нм)	S_H	S_A	P_{MB}	P_{MG}	P_{MR}
340	4	4			
350	5	5			
360	6	6			
370	8	8	Наклон		
380	10	10	= 0.250		
390	12	12	на нм		
400	15	15			
410	18	18	2.103		
420	21	21	4.111		
430	25	25	4.632	Наклон	
440	29	29	4.871	= 0.106	
450	33	33	5.000	на нм	
460	38	38	4.955		
470	43	43	4.743	1.152	
480	48	48	4.343	2.207	
490	54	54	3.743	3.156	
500	60	60	2.990	3.804	
510	66	66	1.852	4.272	
520	72	72		4.626	
530	79	79	Наклон	4.872	
540	86	86	=−0.220	5.000	
550	93	93	на нм	4.995	
560	100	100		4.818	
570	107	107		4.458	
580	111	114		3.915	Наклон
590	115	122		3.172	= 0.260
600	116	129		2.239	на нм
610	119	136		1.070	
620	117	144			2.109
630	113	151		Наклон	4.479
640	107	158		=−0.120	5.000
650	102	165		на нм	4.899
660	94	172			4.578
670	89	179			4.252
680	80	185			3.875
690	72	192			3.491
700	62	198			3.099
710	53	204			2.687
720	45	210			2.269
730	37	216			1.859
740	31	222			1.449
750	24	227			1.054
760	19	232			0.654
770	15	237			0.254
					Наклон = −0.040 на нм

ТАБЛИЦА 14.1 (Продолжение)
ISO-стандартные десятичные логарифмы денситометрических спектральных произведений (P)

Длина волны (нм)	P_{AB}	P_{AG}	P_{AR}	P_{TB}	P_{TG}	P_{TR}
340				< 1.000		
350				1.000		
360				1.301		
370	Наклон = 0.380 на нм			2.000		
380				2.477		
390				3.176		
400				3.778		
410				4.230		
420	3.602			4.602		
430	4.819			4.778		
440	5.000			4.914		
450	4.912	Наклон = 0.220 на нм		4.973		
460	4.620			5.000		
470	4.040			4.987	< 1.000	
480	2.989			4.929	3.000	
490	1.566			4.813	3.699	
500	0.165	1.650		4.602	4.447	
510		3.822		4.255	4.833	
520	Наклон = −0.140 на нм	4.782		3.699	4.964	
530		5.000		2.301	5.000	
540		4.906		1.602	4.944	
550		4.644	Наклон = 0.270 на нм	< 1.000	4.820	< 1.000
560		4.221			4.623	1.000
570		3.609			4.342	1.778
580		2.766			3.954	2.653
590		1.579			3.398	4.477
600			2.568		2.845	5.000
610		Наклон = −0.170 на нм	4.638		1.954	4.929
620			5.000		1.000	4.740
630			4.871		< 1.000	4.398
640			4.604			4.000
650			4.286			3.699
660			3.900			3.176
670			3.551			2.699
680			3.165			2.477
690			2.776			2.176
700			2.383			1.699
710			1.970			1.000
720			1.551			< 1.000
730			1.141			
740			0.741			
750			0.341			
760						
770			Наклон = −0.040 на нм			

Таким образом, стандартные условия измерения копировальных оптических плотностей на пропускание требуют, чтобы в роли источника света выступал стандартный А-осветитель, расположенный за теплопоглощающим фильтром (спектральные распределения энергии А-осветителя за теплопоглощающим фильтром [S_H] и без оного [S_A] даны в табл. 14.1 и на рис. 14.6). Добавка теплопоглощающего фильтра защищает образец от чрезмерного теплового воздействия, чем помогает избежать вероятности получения неправдоподобно низких величин оптических плотностей.

При работе с отражающими материалами в применении теплопоглощающего фильтра нет необходимости: коль скоро максимально достижимые оптические плотности на отражение много меньше максимальных оптических плотностей на пропускание, отклик фотоэлемента на инфракрасное излучение — это лишь малая толика от его общего отклика. Однако когда речь идет об оптических плотностях на пропускание, даже ничтожно малая чувствительность датчика к излучению инфракрасной части спектра может полностью исказить результирующие данные. Таким образом, при работе с пропускающими материалами крайне необходима теплопоглощающая фильтрация светового потока денситометра.

Отметим, что величина ультрафиолетового компонента в спектре стандартного А-осветителя слишком мала для того, чтобы спровоцировать люминесценцию, тем паче когда свет падает на образец, пройдя перед этим через красный, зеленый и синий фильтры. В результате имеет место существенно меньшая облученность образца ультрафиолетом, чем в случае освещения белым светом.

Защита от крайнего красного и инфракрасного излучений рекомендована также при работе телекинооборудования (см. раздел 23.5). В противном случае, если вдруг чувствительность фотоэлементов в этих областях спектра окажется выше, чем у сетчатки глаза, то отличия в спектральных коэффициентах пропускания по крайнему красному и инфракрасному участкам у красителей разных типов могут привести к грубым нарушениям контрастности cyan-воспроизводящего изображения и, следовательно, нарушениям хроматического баланса изображения результирующего (Kozanowski, 1964).

Когда речь идет о цветных негативах, то почти всегда говорят о копировальных оптических плотностях. В маскированных фотоматериалах (таких, как Kodacolor и Eastman Color Negative), то есть материалах, содержащих оптически активные краскообразующие компоненты, минимальные значения копировальных оптических плотностей будут весьма высокими за счет поглощения маской световой энергии в коротковолновой («синей») и средневолновой («зеленой») областях спектра.

Типичные кривые, демонстрирующие копировальные оптические плотности как функцию от десятичного логарифма экспозиции у материалов с оптически активными краскообразующими компонентами, даны на рис. 14.5.

Пленки, предназначенные к регистрации сцен (то есть обычные негативные фотопленки), как правило, имеют гамма порядка 0.65. Мы видим, что характеристические кривые таких пленок (рис. 14.5 [a] и 14.5 [b]) в целом одинаковы, за исключением того, что кривая любительской пленки (рис. 14.5 [b]) длиннее, чем соответствующая кривая пленки профессиональной. Последнее раздвигает границы допустимых погрешностей экспозиции (большая фотографическая широта), что весьма желательно при любительской фотосъемке.

На рис. 14.5 (с) дана кривая промежуточной позитивной дубль-пленки (*Eastman Color Intermediate*) с коэффициентом контрастности очень близким к 1.0 (гамма ≈ 1.0), что позволяет при копировании на эту пленку с *Eastman Color Negative* получить пози-

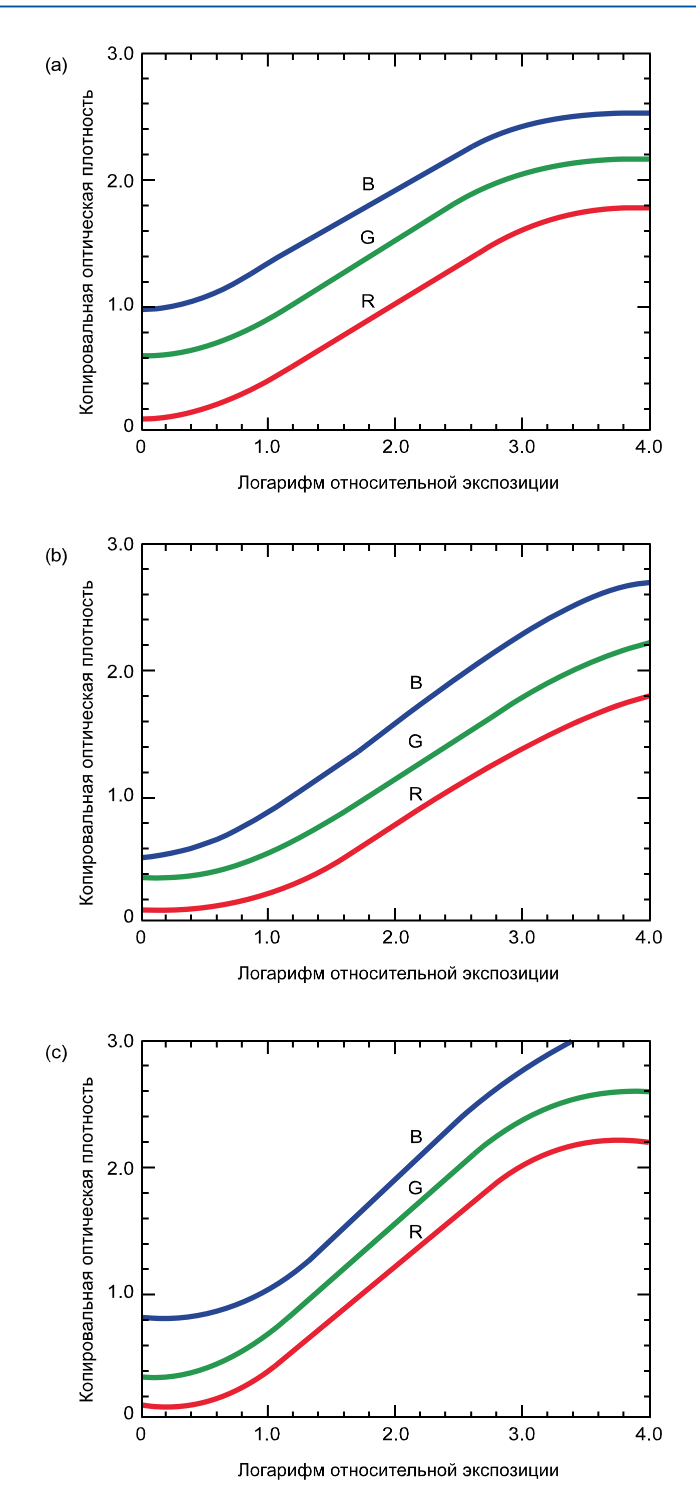


Рис. 14.5 Типичные характеристические кривые цветных негативных фотопленок: (a) — профессиональная негативная фотопленка (класс *Eastman Color Negative*); (b) — любительская негативная фотопленка (класс *Kodacolor*); (c) — промежуточная контратипная пленка (класс *Eastman Color Intermediate*).

Копировальные оптические плотности даны как функции от логарифма относительной экспозиции каждого слоя. Высокие значения минимальных оптических плотностей по синечувствительному и зеленочувствительному слоям объясняются наличием оптически активных краскообразующих компонент.

тивное промежуточное изображение с коэффициентом контрастности примерно равным 0.65. После копирования этого изображения вновь на промежуточную пленку дубль-негатив опять будет иметь гамма 0.65 (см. рис. 12.8), поскольку результирующая гамма изображения, полученного при печати с одного фотоматериала на другой, равна произведению их коэффициентов контрастности.

Наконец стоит отметить, что копировальные оптические плотности Status M базируются на спектральных чувствительностях типичных фотобумаг. Когда при работе со специфическими фотобумагами требуются более точные значения копировальных оптических плотностей фотопленок, их можно вычислить из соответствующих спектральных данных.

14.16 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ

14.16.1 Status A

Нельзя сказать, что спектральное произведение Status M идеально подходит к красителям, используемым в цветных обращаемых фотоматериалах, в связи с чем для последних стандартизировано (ISO, 1984) спектральное произведение *Status A* (см. табл. 14.1 — P_{AB}, P_{AG}, P_{AR} — и рис. 14.7). Осветители при Status A те же, что и при Status M. Отметим также, что ранее в стандарте были прописаны лишь спектральные характеристики Status A-, Status AA- и Status D-фильтров (Brewer, Goddard и Powers, 1955; Miller и Powers, 1963; Dawson и Volgesong, 1973).

Важно отметить, что параметры различных спектральных произведений (Status A, Status M и др.) ориентированы не на какую-либо специфическую сферу применения, а на некий конкретный набор «позитивных» красителей. Следовательно, для общего контроля и тестирования работы того или иного позитивного фотоматериала необходимо подбирать подходящее спектральное произведение.

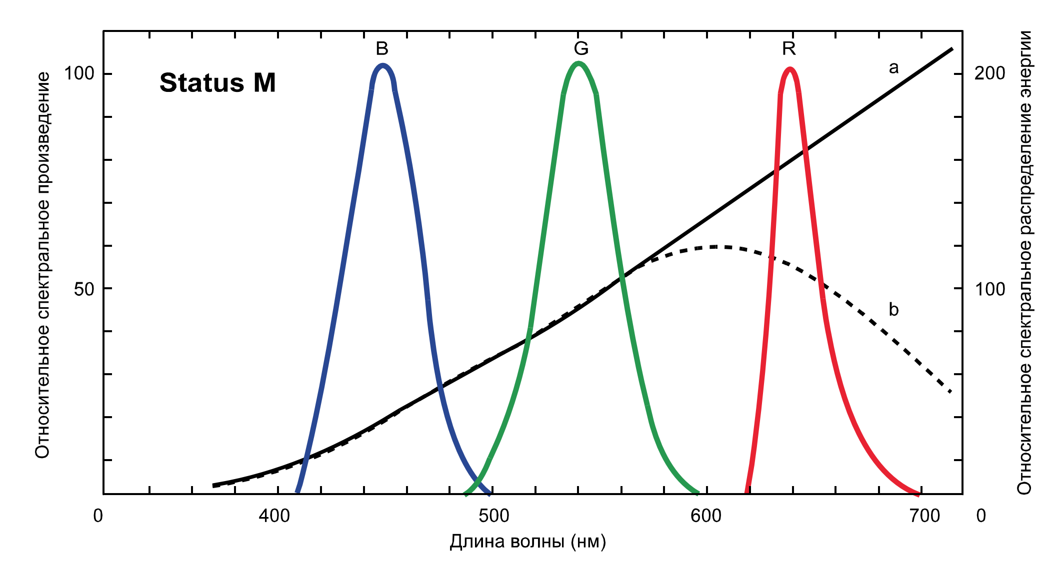


Рис. 14.6 Спектральное произведение Status M, стандартизированное для измерения копировальных оптических плотностей: (a) — относительное спектральное распределение энергии света лампы денситометра на отражение; (b) — относительное спектральное распределение энергии света лампы денситометра на пропускание. Числовые данные см. в табл. 14.1

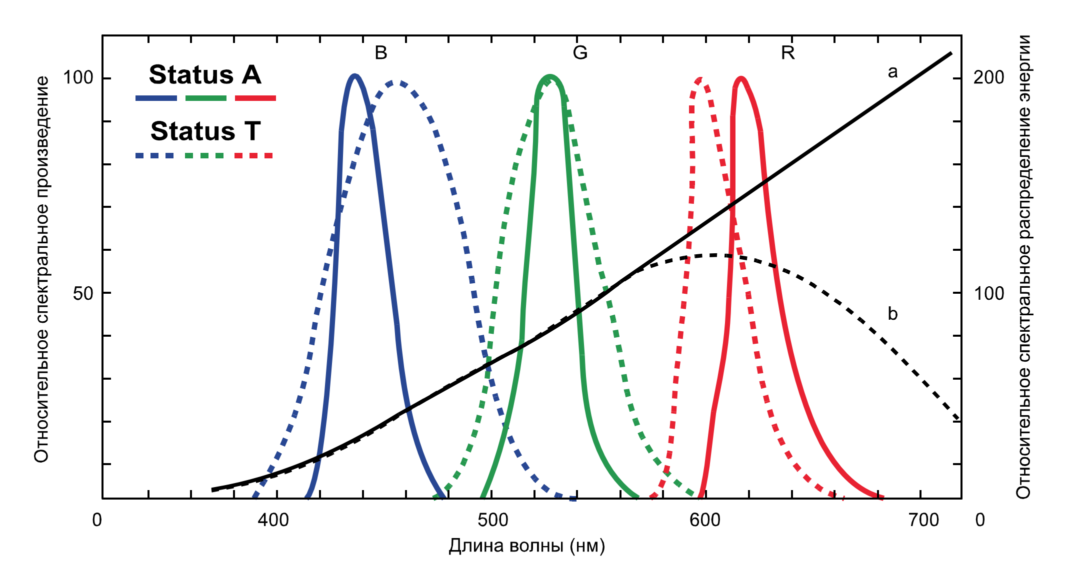


Рис. 14.7 То же, что и на рис. 14.6, но для спектральных произведений Status A (измерение интегральных оптических плотностей в цветных позитивах) и Status T (измерение оптических плотностей цветных сепараций).

Наконец, отметим, что оптические плотности, измеряемые при Status A, часто называют *интегральными оптическими плотностями*, поскольку за каждым фильтром измеряется общий (интегральный) эффект поглощения света всеми красителями по данной спектральной полосе.

14.16.2 Status T

Фильтры, обычно используемые при получении сепарированных негативов с цветных фотооригиналов (см. раздел 15.7, гл. 28 и раздел 32.6), дают результирующие спектральные чувствительности несколько отличные от таковых в спектральном произведении Status A, в связи с чем для описания процесса получения негативных сепараций было принято дополнительное стандартное спектральное произведение *Status T* (табл. 14.1 — P_{TB}, P_{TG}, P_{TR}; рис. 14.7), предполагающее то же спектральное распределение энергии осветителя, что при Status M и Status A (ISO, 1984).

По рис. 14.7 видно, что «синий» и «зеленый» компоненты спектрального произведения Status T шире, чем таковые в Status A, но при этом «красный» спектральный пик Status T расположен на более коротких волнах (в европейском денситометрическом стандарте коротковолновая чувствительность несколько более селективна — *Status E*).

У большинства цветных фотоматериалов и при большинстве фактических осветителей цвет образца с равновеликими значениями интегральных оптических плотностей — близок к серому. Однако точное равенство этих плотностей не обязано соответствовать строго-серому, и, вероятнее всего, при данном конкретном осветителе точного соответствия не будет (если, конечно, спектральное произведение не было специально подобрано к данному набору красителей и спектральному составу освещения).

На рис. 14.8 даны характеристические кривые обращаемой фотопленки, построенные по данным интегральных оптических плотностей. Поскольку в обращаемых пленках высоким уровням экспозиции соответствуют низкие оптические плотности, кривые наклонены вниз (а не вверх, как в негативных фотоматериалах). Отметим, что

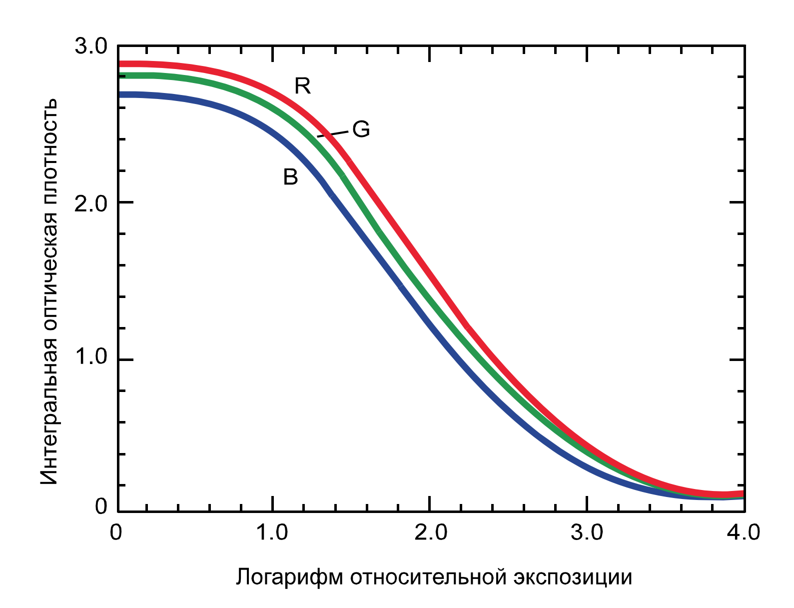


Рис. 14.8 Типичные характеристические кривые цветных обращаемых фотопленок (класса *Ektachrome Commercial*), предназначенных для дальнейшего копирования (но не для проекционного показа). Интегральные оптические плотности даны как функции от десятичного логарифма экспозиции каждого слоя.

приведенные кривые характерны для тех пленок, главное назначение которых — воспроизводить оригинальные изображения в расчете на последующее дуплицирование (к примеру, пленка *Ektachrome Commercial*). Следовательно, характеристические кривые этих пленок почти линейны, то есть коэффициент их контрастности примерно равен 1.0. С пленок данного типа печать обычно выполняется либо на промежуточных негативных пленках с гамма порядка 0.65 (и подобными показанной на рис. 14.5 [а] характеристическими кривыми), либо же на обращаемых фотопленках, пригодных к созданию проекционных слайд-изображений (см. ниже).[1]

На рис. 14.9 дан набор характеристических кривых, где «красная», «зеленая» и «синяя» интегральные оптические плотности даны как функции от десятичного логарифма экспозиции обращаемой (a) и двух контратипных (b и c) негативных пленок; баланс этих пленок таков, что при экспонировании их светом рекомендованной цветности на большинстве экспозиционных уровней результирующие стимулы воспринимаются серыми (разумеется, в предписанных этим материалам условиях просмотра).

Действительно, когда речь идет о проекционном показе в затемненном помещении при желтоватом свете проектора (Hunt, 1965), воспроизведение серого стимула потребует того, чтобы соответствующий элемент изображения при дневном свете выглядел синеватым (см. раздел 5.7). Именно поэтому кривые рис. 14.9 (a) даже приблизительно не совпадают друг с другом: чтобы получить синеватый оттенок при дневном свете «синие» оптические плотности должны быть меньше, чем плотности «зеленые», а «красные» — больше.

Кривые рис. 14.9 (b) относятся к материалу, предназначенному для проекционного

---

[1] Строго говоря, у данных материалов должны измеряться копировальные оптические плотности, однако при позитивных изображениях чаще используются интегральные оптические плотности, причем даже тогда, когда изображения ориентированы на печать.

показа при свете дуговой лампы (кинопленка), а поскольку ее свет белее света лампы накаливания, кривые эти почти совпадают друг с другом. Проекционный серый стимул в этом случае будет почти таким же, как и при рассматривании пленки на дневном свету.

Кривые рис. 14.9 (c) — это характеристические кривые отражающих фотоматериалов (фотобумаг). Мы видим, что они вновь почти совпадают друг с другом, то есть серый стимул типичных условий просмотра этих материалов близок к серому при дневном свете (как было показано в разделе 5.6, в целях улучшения передачи оттенков кожи некоторыми фотоматериалами «серые» тона могут специально воспроизводиться с небольшой подцветкой).

Стоит отметить, что кривые рис. 14.9 нелинейны: в дополнение к «подошве» и «плечу», то есть участкам соответственно наименьших и наибольших оптических плотностей, кривые демонстрируют плавный рост коэффициента контрастности (гамма) по мере роста оптических плотностей элементов изображения. Замечено, что такие изменения гамма дают более визуально комфортные изображения, чем те, что получены на материалах с прямыми характеристическими кривыми: высокие значения дифференциальной (точечной) гамма на высоких оптических плотностях улучшают различимость деталей в глубоких тенях изображений за счет определенного вклада в компенсацию эффектов паразитных подсветок при съемке и в просмотровой ситуации, в то время как низкие дифференциальные значения гамма на низких оптических плотностях предотвращают «огрубление» светов и отодвигают границу допустимых погрешностей экспозиции, то есть увеличивают фотографическую широту фотопленки (см. гл. 6).

У обращаемых фотопленок (рис. 14.9 [a]), ориентированных на проекционный показ в затемненном помещении, гамма на оптических плотностях порядка 1.0 (т.е. примерно соответствующих средне-серому) лежит в районе 1.5, что дает визуально комфортные изображения как на черно-белых, так и на цветных фотоматериалах (Clark, 1953). При этом должно сказать, что гамма 1.0 — недостаточна, поскольку темные области будут восприниматься слишком светлыми из-за высветляющего эффекта темного окружения (что обсуждалось в гл. 6).

Кривые рис. 14.9 (b), относятся к цветным контратипным пленкам, работающим в связке с цветными негативными пленками с гамма 0.65. Следовательно, чтобы в комбинации с негативной пленкой пленка контратипная давала результирующую гамма в районе 1.6, дифференциальное значение гамма на оптической плотности 1.0 у нее должно быть весьма высоким — порядка 2.4 ($0.65 \times 2.4 = 1.6$). Результирующее значение гамма негативно-позитивной системы такого типа будет выше, чем у обращаемых фотопленок (рис. 14.9 [a]), поскольку система эта разработана для нужд профессионального кинематографа, в котором, как правило, имеется возможность удержать контрастность светов на достаточно низком уровне. Сочетание низкой контрастности светов с высокой гамма результирующего изображения дает весьма выгодный рост колориметрической чистоты его элементов.

Кривые, показанные на рис. 14.9 (c), относятся к цветным фотобумагам, ориентированным на получение отпечатков с низкоконтрастных негативных фотопленок. Средне-серый в изображениях, выполненных на отражающих носителях, обычно воспроизводится на оптических плотностях порядка 0.5 при уровне гамма фотобумаги в районе 1.6 (которая, будучи объединенной с гамма 0.65 негативной фотопленки, выдает общий коэффициент контрастности порядка 1.0 [ср. раздел 6.4 и 11.10]). Мы видим, что результирующая гамма негативно-позитивной системы данного типа ниже, чем у

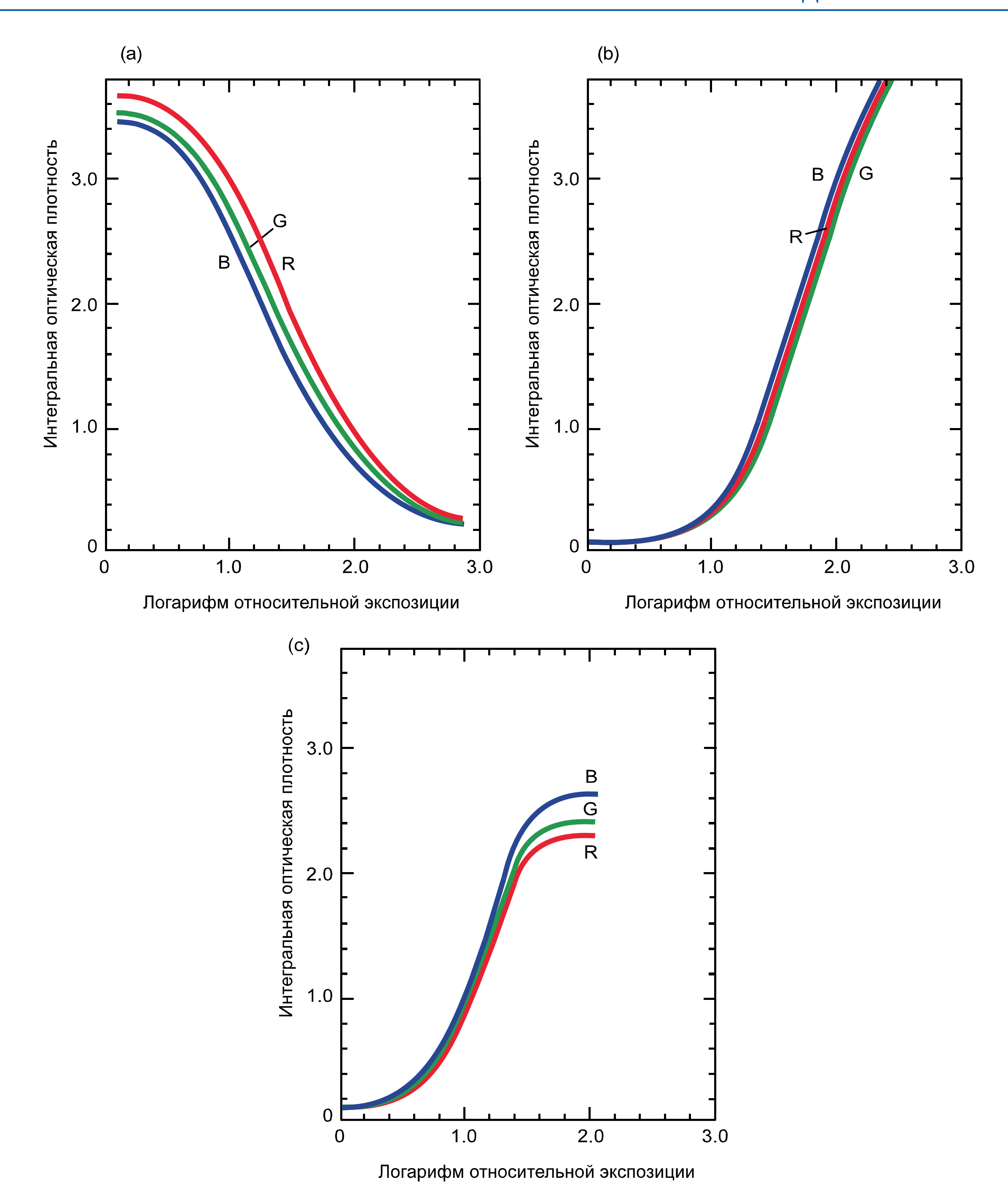


Рис. 14.9 Типичные характеристические кривые цветных фотопленок как функции от десятичного логарифма экспозиции светом балансной цветности. На большинстве уровней экспозиции эти пленки воспроизводят серые цветовые стимулы, когда рассматриваются в свете с предписанной цветностью.

(a) — цветная обращаемая фотопленка класса *Kodachrome*, предназначенная к проекционному показу слайдов в свете лампы накаливания; (b) — цветная позитивная пленка класса *Eastman Color Print*, предназначенная к кинопроекционному показу (дуговые лампы) изображений, полученных с низкоконтрастных негативов; (c) — цветная фотобумага класса *Ektacolor*, предназначенная к производству отпечатков с низкоконтрастных негативных фотопленок класса *Kodacolor*.

слайд-систем, поскольку темные области изображений обычно не подвержены эффекту высветления за счет темного окружения (Bartleson и Breneman, 1967).

Когда пленки рис. 14.9 (а) используются не для проекционного показа, а в качестве оригиналов для производства слайдов или отражающих отпечатков на материалах, которым свойственно аналогичное поведение гамма, — нестабильность гамма этих пленок должна быть компенсирована. Если коррекцию не выполнить, то градиент гамма всей системы удвоится, в результате чего контрастность теней окажется избыточной, а светов — недостаточной (см. рис. 6.15).

На рис. 14.10 даны характеристические кривые промежуточной негативной пленки, обеспечивающей необходимую коррекцию гамма в ситуации, когда со слайда с характеристической кривой рис. 14.9 (а) изображение печатается на фотобумаге с характеристической кривой рис. 14.9 (с): при этом мы знаем, что дифференциальная гамма слайд-изображения варьирует от 0.3 в тенях до 1.0 в светах, в результате чего изображение, полученное со слайда на негативной пленке с гамма 0.65, будет менять дифференциальную гамма от 2.0 в тенях, но только до 0.65 — в высоких светах.

14.17 ЭФФЕКТЫ ФОРМ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ КРИВЫХ

Одной из главных задач денситометрии в фотографии является выявление формы характеристической кривой фотоматериала, что позволяет контролировать изменения тоновоспроизведения на разных уровнях оптической плотности. Сразу заметим, что для полноты информации необходим учет величин паразитной подсветки в фотоаппарате и просмотровой паразитной подсветки, которые всегда немного отличны от сенситометрической и денситометрической паразитных подсветок соответственно. Плюс к тому, когда исследуется система, состоящая из нескольких репродукционных этапов (будь то контактная печать или проекционная), должен учитываться еще и эффект паразитной подсветки печати (см. гл. 6 и раздел 13.10).

14.17.1 Эффекты нелинейности

Тот факт, что фотографические характеристические кривые никогда не бывают строго линейны, существенно усложняет ситуацию (см. рис. 14.11). Для простоты иллюстрации сего тезиса допустим, что интегральные оптические плотности некоей экспонированной и обработанной цветной обращаемой фотопленки таковы, что серая шкала при данном освещении представлена тремя кривыми, лежащими одна поверх другой (рис. 14.11 [a]). Если такую пленку экспонировать светом иной цветности, скажем, чуть более синим, результат может оказаться подобен тому, что показан на рис. 14.11 (b): «синяя» кривая будет смещена относительно двух других кривых вдоль оси логарифмов экспозиции.

Положение можно поправить за счет желтого фильтра на объективе *фотоаппарата*, в результате чего «синяя» кривая сместится назад (рис. 14.11 [c]). Однако исходный «синий» сдвиг кривой невозможно компенсировать с помощью желтого фильтра на объективе проектора (или непосредственно на самом слайде), поскольку «синяя» кривая сместится в этом случае не горизонтально (т.е. вдоль оси экспозиций), а вертикально — вдоль оси оптических плотностей (рис. 14.11 [d]).

Если бы характеристические кривые фотопленок были линейны, то для их сведéния можно было бы использовать как горизонтальный, так и вертикальный сдвиги; однако коль скоро графики нелинейны, вертикальный сдвиг приводит к «гиперкор-

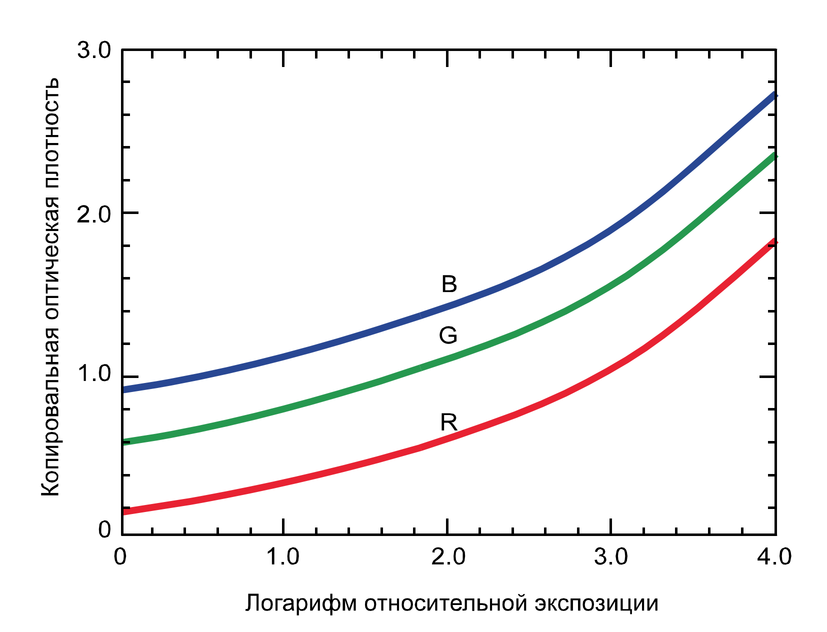


Рис. 14.10 Характеристические кривые промежуточной негативной пленки, гамма которой так растет по мере роста экспозиции, что нивелирует гамма-вариации обращаемых фотопленок класса *Kodachrome* (рис. 14.9 [а]).

рекции» на низких плотностях и «гипокоррекции» на высоких («гиперкоррекция» на очень высоких плотностях в отношении слайдов обычно не столь значима).

Отметим, что общий сдвиг хроматического баланса от желтого, через серый, к синему существенно снижает качество результирующего изображения. По этой причине, когда цветная обращаемая пленка экспонируется при свете, отличном от того, под который она была сбалансирована, для получения наилучших результатов должен применяться коррекционный фильтр на объективе именно *фотоаппарата*, но не проектора. Наоборот: когда точно известно, что предстоит съемка при осветителях с разными цветностями и, следовательно, использование коррекционных фильтров на объективе аппарата невозможно, — должна использоваться пленка с линейной характеристической кривой, поскольку коррекцию изображений на такой пленке можно успешно выполнить путем их *проектирования* через коррекционные фильтры.

Также интересно отметить то, что в описанных случаях определенная коррекция возникает сама за счет хроматической адаптации зрения *по изображению*; последняя наступает почти моментально, что легко продемонстрировать с помощью т.н. *двухцветных проекций* Эдвина Лэнда (Land, 1959): в опытах Лэнда зрение наблюдателей эффективно обесцвечивало свет лампы проектора за счет адаптации по изображению.

Однако когда характеристическая кривая фотопленки нелинейна, степень цветового сдвига на разных оптических плотностях будет разной, и сдвиг этот уже не сможет имитировать смену освещения в зарегистрированной сцене. В результате степень визуальной адаптации будет много меньше желаемой.

14.17.2 Эффекты насыщения и разбеливания

Ограниченность диапазона экспозиций, в рамках которого фотоматериал способен выдать адекватный отклик, при выходе за пределы этого диапазона может привести к серьезным изменениям цветового тона элементов изображения. К примеру,

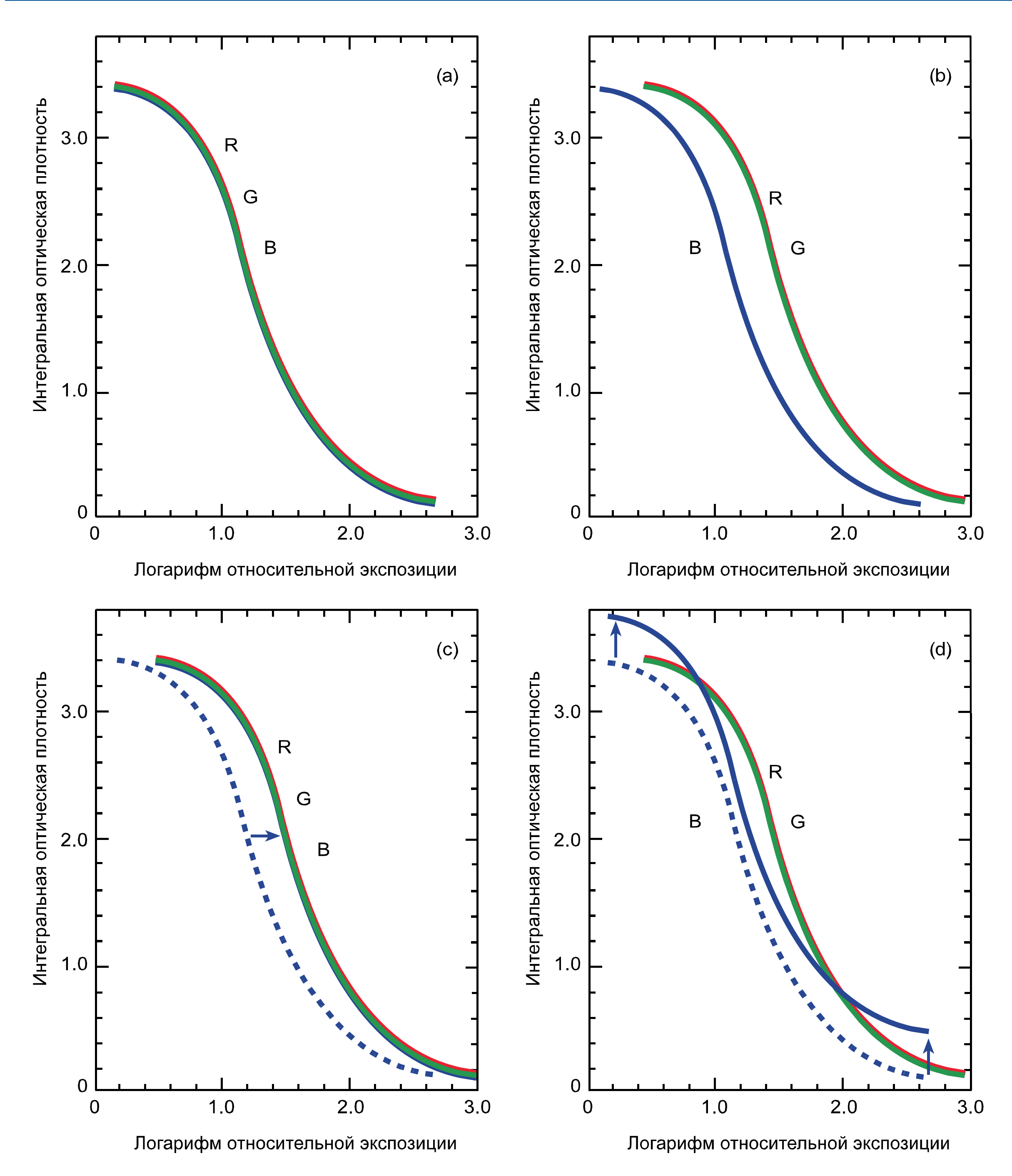


Рис. 14.11 Характеристические кривые типичной цветной обращаемой фотопленки: (a) — экспозиция светом, соответствующим цветовому балансу пленки; (b) — экспозиция светом, цветность которого смещена в синюю сторону от балансной; (c) — то же, что (b), но с коррекцией при помощи желтого фильтра на объективе камеры; (d) — неудачная попытка коррекции с помощью желтого фильтра на объективе проектора или на слайде.

красновато-пурпурный объект сцены обычно по максимуму экспонирует красночувствительный слой фотоматериала, по минимуму — зеленочувствительный и в средней степени — синечувствительный. Когда уровень экспозиции плавно растет (например, за счет увеличения освещенности объекта в сцене, просвета диафрагмы объекти-

ва либо выдержки), предел наступает тогда, когда красночувствительный слой выходит на максимум своего отклика, что в свою очередь ведет к нехватке тоновых модуляций в изображении и сдвигу его цветового тона в пурпурную сторону. Если уровень экспозиции повышать дальше, то на максимум выходит отклик по синечувствительному слою, а поскольку максимальные отклики всех трех слоев могут в этом случае оказаться одинаковыми, отличие между красным и синим откликами исчезнет и изображение объекта станет пурпурным. Наконец, когда на максимум выходит отклик зеленочувствительного слоя, то все три отклика уравниваются и изображение становится просто белым. Следовательно, цвет изображения красновато-пурпурного объекта будет меняться от исходного через пурпурный к белому.

Разбеливаются (т.е. теряют свою колориметрическую чистоту при одновременном росте фотометрической яркости. — *Прим. пер.*) только те стимулы сцены, что вызывают одинаковые отклики каких-либо двух (но не трех) светочувствительных слоев, — они выходят на белый плавно, то есть не давая каких-либо сдвигов цветового тона. К таким стимулам относятся: однозначные красный, зеленый, синий, голубой, пурпурный и желтый.[1]

Отметим, что аналогичные явления возникают в телевидении и в полиграфии, поскольку и в первом, и во втором случаях трихроматические каналы (или печатные формы) дают отклики лишь в узком диапазоне экспозиций. Изменения в цветовом тоне тем заметнее, чем ниже уровень яркостных модуляций или чем выше степень разбеливания цветового стимула.

Возникновение описанных эффектов более вероятно в отношении стимулов высокой колориметрической чистоты, поскольку различие в экспозиции трех фотографических слоев, каналов или печатных форм в этом случае больше. По этой же причине такие эффекты чаще проявляют себя в фотоматериалах с высокими уровнями межслойного эффекта (см. раздел 15.5), маскирования (см. разделы 15.6 и 23.13) или матрицирования (см. раздел 19.2).

Описанные явления наиболее заметны в отношении красновато-пурпурных и синевато-пурпурных стимулов, поскольку последние могут обладать очень высокой колориметрической чистотой (см. рис. 14.12).

Наконец, отметим, что сходные эффекты могут возникать при заниженных уровнях экспозиции, но, поскольку последние в основном касаются темных областей изображения, эти явления не столь выражены.

14.18 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ

При сравнении результатов денситометрии фотоматериалов, построенных на разных наборах красителей, возникает необходимость в колориметрических измерениях, что выполнимо с помощью денситометров, оснащенных соответствующими фильтрами. Таким образом, если комбинация спектрального распределения энергии света, испускаемого лампой денситометра и подкорректированного оптикой прибора, спектральных коэффициентов пропускания трех измерительных фильтров и спектральной чувствительности фотоэлемента таковы, что описываются функциями:

---

[1] Сдвиг цветового тона в фиолетовую сторону при разбеливании синих стимулов всегда хорошо заметен, что объясняется особенностями (формой) цветового охвата человеческого зрения. — *Прим. пер.*



Рис. 14.12 Стимулы высочайшей колориметрической чистоты, которые в солнечные дни порой создаются лепестками цветов и листвой, иногда можно воспроизвести в проходящем свете (т.е. с помощью диапозитивов). В нашем примере высокочистый красно-пурпурный цветовой стимул высокой фотометрической яркости (не подверженный эффектам десатурации за счет поверхностных переотражений) создан лепестками цветов бугенвиллии, освещенными солнцем на просвет.

Ограниченность фотометрической яркости репродукционных стимулов приводит к некоторым весьма интересным цветоискажениям: в темных областях уровни экспозиции слоев фотоматериала (или каналов телекамеры) примерно одинаковы, однако по мере роста уровня экспозиции отклики красночувствительного, затем синечувствительного и, наконец, зеленочувствительного слоев (каналов) достигают своего предела. Достижение максимального отклика по красночувствительному слою ведет к утрате тоновых модуляций в лепестках; по синечувствительному слою сопровождается смещением их цветового тона от красно-пурпурного к пурпурному (поскольку отклики красночувствительного и синечувствительного слоев уравниваются); по зеленочувствительному — к разбеливанию (поскольку отклики по всем слоям становятся одинаковыми). Отметим, что эффекты, подобные описанному, возникают как в фотографии, так и в телевидении и полиграфии (см. раздел 14.17).

Заметим также, что в нашем примере высокая фотометрическая яркость красно-пурпурного стимула приводит к рефлексу этого стимула на лицо девушки (чего следует всячески избегать, бо данный эффект больше проявляет себя на изображениях, нежели в реальных сценах).

$$E_A(\lambda)\bar{x}(\lambda)$$

$$E_A(\lambda)\bar{y}(\lambda)$$

$$E_A(\lambda)\bar{z}(\lambda)$$

где $E_A(\lambda)$ — спектральное распределение энергии света стандартного А-осветителя, результат измерения трех зональных оптических плотностей будет равен:

$$\mathrm{Lg}(1/X_A)+k_X$$

$$\mathrm{Lg}(1/Y_A)+k_Y$$

$$\mathrm{Lg}(1/Z_A)+k_Z$$

где k_X, k_Y и k_Z — обнуляющие постоянные, а X_A, Y_A и Z_A — трехстимульные значения образца, освещенного стандартным А-осветителем. Измерение, организованное по такому принципу именуется измерением *колориметрических оптических плотностей*.

Колориметрические оптические плотности позволяют сравнивать образцы, организованные разными наборами троек красителей, к примеру: когда трехстимульные значения, вычисленные из колориметрических оптических плотностей, оказываются в тех же соотношениях, что и трехстимульные значения фактического осветителя — образцы выглядят идеально серыми, независимо от своего красочного состава.

Сказанное также относится к денситометрам, характеристики которых идентичны какой-либо линейной комбинации трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (см. разделы 7.4 и 8.3). Однако практическая реализация требуемых спектральных чувствительностей денситометрических фотоэлементов достаточно сложна, поэтому образцы, полученные за счет разных наборов красителей, обычно измеряют колориметрически (см. раздел 8.5).

14.19 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ

Измерение интегральных оптических плотностей по единичным длинам волн в «красной», «зеленой» и «синей» зонах спектра с помощью специальных узкополосных фильтров — это измерение *спектральных оптических плотностей* или *монохроматических оптических плотностей*.

Спектральные оптические плотности представляют большую информационную ценность, поскольку оптические плотности на пропускание большинства красителей *аддитивны*, то есть общая оптическая плотность изображения, организованного из последовательных слоев cyan-, magenta- и yellow-красителей, по «красной» области спектра равна сумме «красных» оптических плотностей по каждому слою в отдельности, по «зеленой» области — равна сумме «зеленых» оптических плотностей и по «синей» — сумме «синих» оптических плотностей по каждому слою в отдельности.

Важно отметить, что спектральные оптические плотности на пропускание большинства красителей подчиняются *правилу пропорциональности*, суть которого в том,

что изменение концентрации любого красителя ведет к пропорциональному изменению всех его спектральных оптических плотностей, то есть умножению их на некий коэффициент. Таким образом, если, к примеру, оптическая плотность красителя по «красной» зоне спектра выросла на 50% , то оптические плотности по «зеленой» и «синей» зонам вырастут также на 50% (см. также раздел 15.7).

14.20 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ

Когда интерес представляет не только результирующее цветное изображение, но каждое из воспроизводящих красочных изображений в отдельности, пользуются т.н. *аналитическими* (расчетными) *оптическими плотностями* (поскольку в обработанном фотоматериале красочные сепарации неотделимы друг от друга. — *Прим. пер.*).

При оценке светопропускающих материалов аналитические оптические плотности можно получить из спектральных оптических плотностей путем решения системы уравнений: коль скоро из правила пропорциональности следует то, что, если оптическая плотность cyan-красителя по некоей «красной» длине волны равна C_R, спектральные оптические плотности по «зеленой» и «синей» длинам волн будут равны k_1C_R и k_2C_R, где k_1 и k_2 — константы. Аналогично если спектральная оптическая плотность magenta-красителя равна M_G по некоей «зеленой» длине волны, оставшиеся две спектральных оптические плотности будут равны k_3M_G и k_4M_G (где k_3 и k_4 — константы). Наконец, если спектральная оптическая плотность yellow-красителя по «синей» длине волны равна Y_B, то остальные две — k_5Y_B и k_6Y_B (k_5 и k_6 — константы).

Следовательно, благодаря свойству аддитивности интегральные спектральные оптические плотности на пропускание (I_R, I_G, I_B) буду равны:

$$I_R = C_R + k_3 M_G + k_5 Y_B + r_S$$
$$I_G = k_1 C_R + M_G + k_6 Y_B + g_S$$
$$I_B = k_2 C_R + k_4 M_G + Y_B + b_S$$

где r_S, g_S, b_S — константы, позволяющие учесть оптическую плотность вуали, не зависящую от изменения концентрации всех трех красителей.

Итак, если постоянные $k_1 \ldots k_6$ известны, мы можем вычислить аналитические оптические плотности C_R, M_G, Y_B.

Для того чтобы определить величины k-постоянных, необходимо измерить отношения поглощений красителей в их максимальных концентрациях к поглощениям в концентрациях минимальных (Pinney и Voglesong, 1962), то есть путем измерения соответствующих участков трех красочных изображений мы определяем величины $k_1 \ldots k_6$ и r_S, g_S, b_S.

На рис. 14.13 показана кривая спектральной оптической плотности на пропускание участка типичной фотопленки, который при рассматривании на свету с цветовой температурой 4000 К создает нейтрально-серый стимул (на ось абсцисс графика нанесен диапазон длин волн, оптимальный для измерения спектральных оптических плотностей). Там же показаны исходные кривые спектральной оптической плотности на пропускание каждого из красителей: четко видно, что интегральные спектральные оптические плотности можно получить из аналитических спектральных оптических плотностей.

Стоит сказать, что часто бывает удобным умножать спектральные аналитические

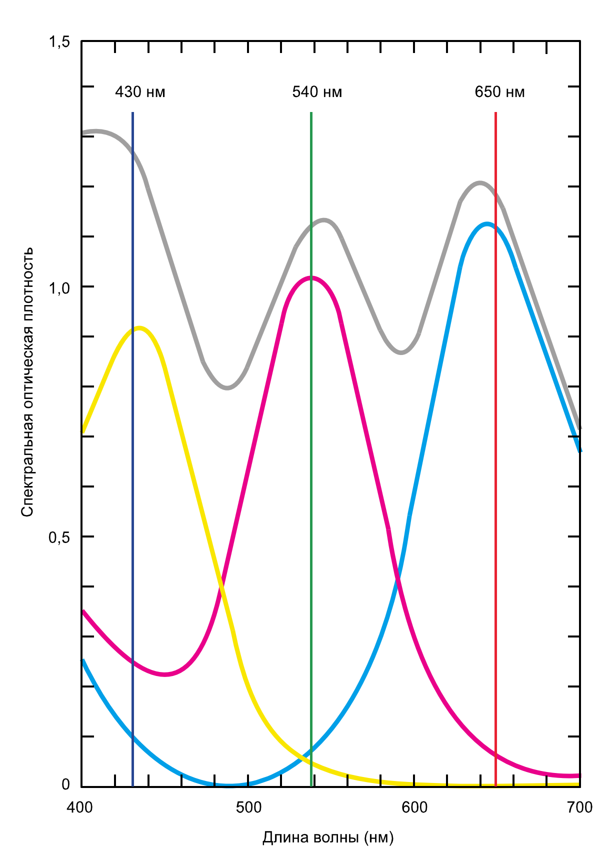


Рис. 14.13 Кривая спектральной оптической плотности образца, который воспринимается серым при свете с цветовой температурой 4000 К (серая линия); желтая, голубая и пурпурная линии — кривые спектральной оптической плотности пигментов, формирующих данный образец на типичных цветных фотопленках. Три вертикальных линии указывают на длины волн, подходящие для замера спектральных оптических плотностей в этих пленках.

оптические плотности C_R, M_G, Y_B на три специально подобранных коэффициента, благодаря чему при измерении какого-либо серого образца спектральные аналитические оптические плотности (модифицированные этими коэффициентами) приобретают некие специфические значения, к примеру: выбранный образец может оказаться таков, что при рассматривании в свете источника с цветовой температурой 4000 К, он воспринимается строго-серым и имеет *визуальную плотность*[1] равную 1.0 (иными словами: трехстимульные значения образца в этом случае составляют строго одну десятую от каждого трехстимульного значения идеального отражающего рассеивателя, освещенного этим же источником). Множители обычно подбираются так, чтобы каждая из трех спектральных аналитических оптических плотностей по данному образцу оказалась равной единице. Когда сие выполнено, то равные величины спектральных аналитических оптических плотностей на всех своих прочих уровнях будут точно соответствовать строго-серым тонам (разумеется, при том же осветителе [4000 К]) по большинству наборов красителей. Величины спектральных аналитических оптических плот-

[1] *Визуальная плотность* — величина, основанная на CIE-кривой фотопической световой эффективности — $V(\lambda)$.

ностей в этом случае будут согласованы с показателями т.н. *эквивалентной нейтральной визуальной плотности* красителей (Sant, 1970):

⇨ *Эквивалентная нейтральная визуальная плотность* любого красителя при любой его концентрации — это та визуальная плотность, которая образуется при добавлении к данному красителю двух других красителей в количествах, необходимых для создания нейтрально-серого стимула.

Итак, на основе сказанного выше приходим к тому выводу, что аналитические оптические плотности можно вычислить лишь из достоверно известных монохроматических спектральных оптических плотностей. Однако когда вместо спектральных данных в нашем распоряжении имеются лишь интегральные оптические плотности, зафиксированные с помощью денситометра Status A, то за счет свойств аддитивности и пропорциональности удается получить лишь приблизительные значения аналитических оптических плотностей. Впрочем (за исключением лишь очень темных областей изображения) погрешности измерения будут невелики. То есть аналитические оптические плотности фактически можно получить из неспектральных интегральных оптических плотностей.

В случаях, когда имеют место серьезные отклонения от принципа пропорциональности и аддитивности, можно выполнить более тщательные процедуры, задействующие измерения на дополнительных длинах волн (Baumann, 1980; Muller, 1980).

14.21 ОПТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ НА ОТРАЖЕНИЕ

Поверхностные слои всех материалов рассеивают некоторое количество света, но примечательно то, что в случае фотографических отпечатков свет этот не подвержен влиянию красителей. Следовательно, денситометры на отражение обычно конструируются так, чтобы минимизировать воздействие этого света на свой фотоэлектрический датчик (см. раздел 13.12). Поскольку большинство поверхностей обладают определенным глянцем, фотоэлемент устанавливают в положение, надежно удаленное от позиции зеркального отражения источника света (то есть от позиции максимального отражения).

Два возможных (и наиболее распространенных) варианта конструкции приборов даны на рис. 14.14: освещение по нормали к поверхности — замер под углом 45° (геометрия 0/45), и наоборот (45/0). В первом случае свет, отраженный под углом 45° по всем направлениям от нормального светового потока, собирается с помощью высокоэффективного полусферического зеркала (Watt, 1956).

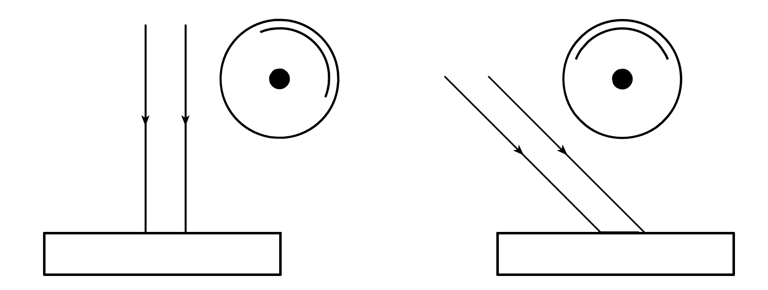


Рис. 14.14 Два возможных варианта геометрии измерения оптических плотностей на отражение.

В денситометрии на пропускание, также как и в денситометрии на отражение, действуют определенные стандарты, в которых указано, что два световых потока должны иметь отклонение от номинальных 45° и взаимного перпендикуляра не больше чем ±5° (American Standards Association, PH 2.17, 1958).

С целью предотвращения паразитной подсветки, понижающей максимальные оптические плотности, внутренние поверхности денситометров на отражение, как правило, тщательно чернятся.

14.22 АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ НА ОТРАЖЕНИЕ

Коль скоро между диффузной основой и поверхностным слоем отражающих фотоматериалов имеют место эффекты переотражения (см. гл. 13.9), к денситометрии на отражение неприменимы принципы аддитивности и пропорциональности (причем даже тогда, когда речь идет о монохроматических интегральных оптических плотностях на отражение). Однако об аналитических оптических плотностях на отражение все же можно говорить, если применить следующий прием: пересчитать с помощью калибровочной кривой интегральную оптическую плотность на отражение в интегральную оптическую плотность на пропускание, вычислить аналитические оптические плотности, а затем вновь с помощью калибровочной кривой пересчитать аналитические оптические плотности на пропускание в аналитические оптические плотности на отражение (Pinney и Volgesong, 1962).

Отметим, что на высоких оптических плотностях калибровочная кривая зависит от степени глянца поверхности измеряемого образца и величины паразитной подсветки денситометра (типичная кривая показана рис. 14.15). В светах изображения оптическая плотность на отражение, по мере роста оптической плотности на пропускание, растет очень быстро за счет внутренних переотражений; в средних тонах оптических плотностях переотражения начинают прогрессивно терять свое значение и отношение оптической плотности на отражение к оптической плотности на пропускание приближается к 2.0 (или 2.13 при геометрии измерения 45/0 [Williams и Clapper, 1953]), чего можно ожидать при двойном проходе света через поверхностный слой отражающего фотоматериала (см. гл. 13). Однако в тенях поверхностные отражения становятся все более и более значимыми, в результате чего отношение оптической плотности на отражение к оптической плотности на пропускание падает ниже 2.0 (после чего выходит на финальное значение, которое обычно много меньше удвоенной максимальной оптической плотности на пропускание).

В диапазоне оптических плотностей на отражение от 0.8 до 1.8 кривая рис. 14.15 более или менее линейна, и для плотностей, лежащих внутри этого диапазона, аналитические оптические плотности на отражение можно удовлетворительно аппроксимировать системой уравнений, аналогичной той, что используется при вычислении аналитических оптических плотностей на пропускание (см. раздел 14.20); особенность состоит лишь в специальном расчете констант (Onley, 1960).

14.23 ЭКСПОЗИЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПЛОТНОСТИ

В отношении обычных фотопленок, регистрирующих сцену, интерес представляют данные о десятичных логарифмах экспозиции по красно-, зелено- и синечувствительным слоям фотоматериала (иногда эти данные называют *актиничными экспозициями*).

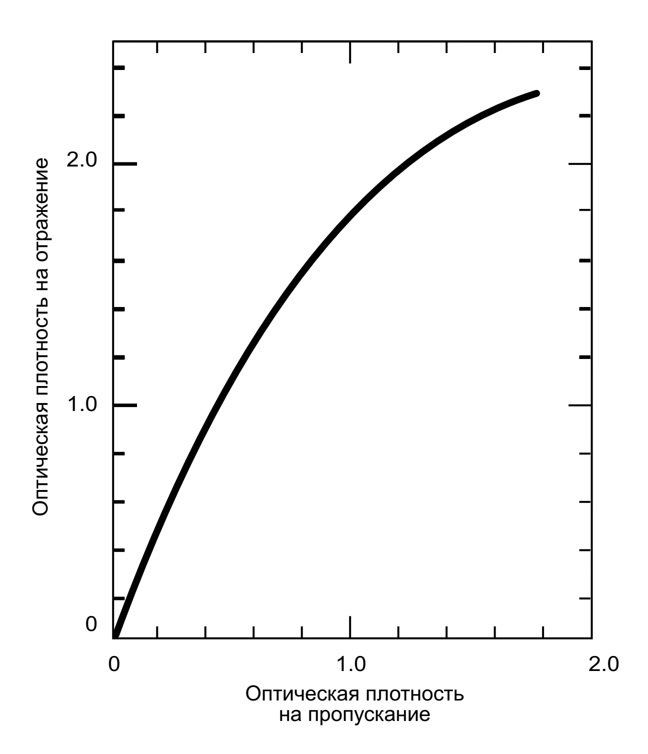


Рис. 14.15 Оптическая плотность на отражение как функция от оптической плотности на пропускание эмульсионного слоя типичной глянцевой фотобумаги (при условии измерения денситометром на отражение, способным к регистрации высоких оптических плотностей).

Десятичные логарифмы зональных экспозиций весьма удобно оценивать относительно десятичных логарифмов некоего стандартного объекта в сцене, в частности такого, как идеально отражающий и, одновременно, идеально рассеивающий белый.

Отклонения логарифмов экспозиции от неких стандартных значений именуются *экспозиционными оптическими плотностями*, к примеру: изображение некоего объекта, имеющее десятичный логарифм экспозиции красночувствительного слоя на 0.3 меньше стандартного значения, будет иметь экспозиционную оптическую плотность по красночувствительному слою («красную» экспозиционную оптическую плотность) равную 0.3; изображение объекта, имеющее десятичный логарифм экспозиции зеленочувствительного слоя на 0.1 выше стандартного значения, будет иметь «зеленую» экспозиционную оптическую плотность –0.1.

Экспозиционные оптические плотности отражающих образцов можно измерить непосредственно, если денситометр на отражение оснащен фильтрами, благодаря которым его спектральные чувствительности повторяют таковые у интересующей фотопленки. Вместе с тем, их можно *вычислить* из известных спектральных характеристик источника света денситометра, спектрального коэффициента отражения измеряемого образца, спектральных чувствительностей фотопленки и спектрального коэффициента пропускания объектива прибора.

Отметим, что ни в первом, ни во втором случаях эффекты атмосферной дымки и паразитной подсветки объектива невозможно учесть автоматически. Однако в ряде ситуаций такой учет может оказаться важным и экспозиционные оптические плотности придется измерять с помощью *дистанционных* фотоэлектрических фотометров (телефотометров), оснащенных соответствующими фильтрами.

14.24 ШКАЛЫ РАВНЫХ ВИЗУАЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ[1]

Как было показано в разделе 14.12, одной из предпосылок к использованию логарифмических шкал экспозиции и шкал оптической плотности (вместо шкал собственно экспозиции и коэффициента пропускания) явилось то, что логарифмические шкалы неплохо аппроксимируют равномерные визуальные интервалы субъективной яркости элементов изображения. Однако психофизические исследования показывают, что в отношении отражающих образцов лучшей была и остается шкала манселловской светлоты, определяемая эмпирической формулой:

$$R = 1.2210V - 0.23111V^2 + 0.23951V^3 - 0.021009V^4 + 0.0008404V^5$$

где R — это коэффициент отражения образца, выраженный в %, а V — манселловская светлота (Newhall, Nickerson и Judd, 1943).[2]

На рис. 14.16 манселловская светлота дана как функция от оптической плотности на отражение — Lg(100/R): мы видим, что небольшие изменения в низких оптических плотностях ведут к гораздо бóльшим изменениям манселловской светлоты, чем изменения в средних плотностях и тем более в высоких.[3] Сей факт имеет огромное практическое значение, поскольку любые погрешности измерений по низким оптическим плотностям визуально более значимы, чем погрешности по средним и тем более высоким. Следовательно, более информативной и удобной в использовании является манселловская светлота, взятая как функция от десятичного логарифма *экспозиции* отражающих материалов. Сразу отметим, что использование линейной шкалы экспозиций нецелесообразно, поскольку в оригинальных сценах обычно имеют место вариации уровня освещенности по разным участкам сцен (и зрение способно в определенной степени нивелировать эти вариации [Evans, 1943]), тогда как шкала манселловской светлоты применима лишь к условиям равномерной освещенности.

Определение манселловской светлоты через вышеприведенную формулу весьма сложно,[4] поэтому в большинстве случаев вместо нее используется шкала L^*, построенная на следующей основе:

$$L^* = \sqrt[3]{116(Y / Y_n)} - 16$$

где Y / Y_n — коэффициент отражения.

Когда интересующие образцы рассматриваются в тусклом или темном окружениях

---

1 Очевидный на первый взгляд перевод названия данного раздела («Scales of equal visual increments») «Равноконтрастные шкалы» неуместен, поскольку создает путаницу между понятиями «контраст», «контрастность», «визуальный контраст» и «визуальная контрастность». — *Прим. пер.*

2 Формула широко известна как «полином Джадда». — *Прим. пер.*

3 Может показаться, что сказанное противоречит корнекубическому закону Стивенса, однако следует помнить о том, что шкала оптических плотностей — это энергетически *нелинейная* шкала, представляющая собой десятичный логарифм энергетически линейных значений. — *Прим. пер.*

4 Поскольку согласно теореме Абеля полиномы пятого порядка неразрешимы в радикалах. — *Прим. пер.*

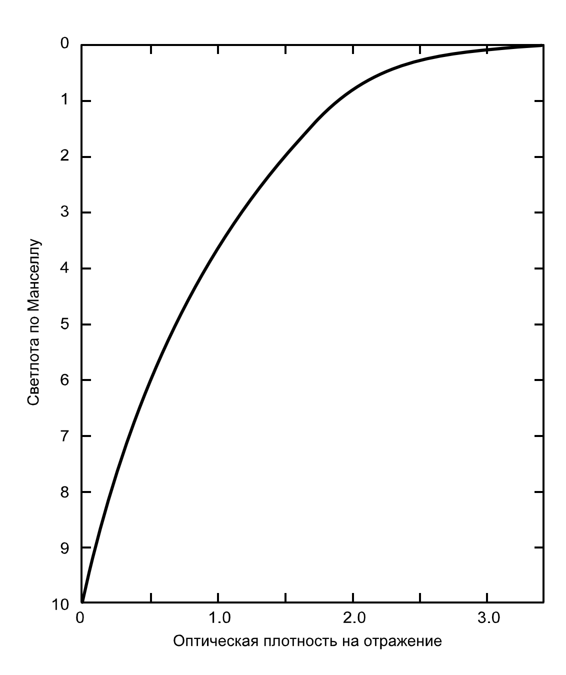


Рис. 14.16 Манселловская светлота как функция от оптической плотности на отражение (в данном случае за ноль принята оптическая плотность на отражение оксида магния, но при этом значение 10 манселловской светлоты соответствует идеальному отражающему рассеивателю; коль скоро коэффициент отражения оксида магния равен 98%, нулевая оптическая плотность на отражение будет соответствовать манселловской светлоте 9.90).

(см. раздел 6.5), падение визуального контраста можно учесть с помощью поправок к вышеприведенному уравнению (см. разделы 8.8 и 35.16):

$$L^*_{\text{темн.}} = \sqrt[4.5]{116(Y/Y_n)} - 16$$

или

$$L^*_{\text{тускл.}} = \sqrt[3.75]{116(Y/Y_n)} - 16$$

или же путем применения специальных моделей цветового восприятия, таких как CIECAM97s или CIECAM02 (см. гл. 35 и прил. 6).

14.25 ТРЕХЛИНЕЙНЫЕ ДИАГРАММЫ

В цветной фотографии хроматический баланс изображения — это важнейшая переменная, которую подчас весьма полезно оценить вне какой-либо связи с общим уровнем оптических плотностей в этом изображении. Раньше с этой целью на миллиметровой бумаге с треугольной ячейкой вычерчивались диаграммы отличий по оптическим плотностям: примером такой диаграммы может служить рис. 16.1, на котором красно-зеленые отличия по копировальным оптическим плотностям даны как функция от сине-зеленых отличий. Трехлинейные диаграммы строились также для интегральных, аналитических, колориметрических и экспозиционных оптических плотностей.

Величина визуальных отличий между двумя цветовыми стимулами, представленными двумя точками на трехлинейной диаграмме, зависит от:

— характера спектральной сенсибилизации данного фотоматериала;

— типа денситометра;
— абсолютной оптической плотности элементов изображения;
— условий просмотра.

Сегодня трехлинейные диаграммы (в случае необходимости) можно моментально воспроизвести на компьютере.

14.26 СТАБИЛЬНОСТЬ КРАСОЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Красители, из которых формируются изображения в цветных фотографических материалах, могут подвергаться влияниям нагрева, сырости и интенсивного света (Hubell, McKinney и West, 1967; Adelstein, Graham и West, 1970; Schafer, 1972; Giles, Forrester, Haslam и Horn, 1973). Степень этих влияний различна. Однако выцветание изображения, вызванное длительным интенсивным световым воздействием на красители, и его пожелтение в результате воздействия ультрафиолетового излучения на оставшиеся в слоях фотоматериала неиспользованные краскообразующие компоненты всерьез проявляют себя спустя лишь весьма длительный срок (Gale и Williams, 1963). С целью противостояния обесцвечиванию и пожелтению совершенствуются как сами краскообразующие компоненты, так и методы обработки фотоматериалов и т.п. (см. раздел 17.9) (De Mitri, 1960; Bermaine, 1974; Giles и Haslam, 1974; Tull, 1974; Happe, 1974; Moore, 1974; Rogers, Idelson, Cieciuch и Bloom, 1974; Patterson, 1981; Journal of Photographic Science, 1988).

Долгосрочный прогноз стабильности фотографических красителей при темновом хранении изображений обычно выполняется с помощью т.н. *форсированных тестов*, в которых фотоматериал подвергают воздействию высоких температур и влажности. При этом считается, что логарифм времени, необходимого для снижения оптической плотности с 1.0 до 0.9, обратно пропорционален температуре в кельвинах (T_k):

$$\lg t_{10} = 1 / T_k$$

Проводя тесты с нагревом, к примеру до 60°C и 85°C, t_{10} можно экстраполировать ко времени, соответствующему типичным комнатным температурам (в среднем 24°C). Современные фотографические красители дают расчетное значение по комнатным температурам порядка 50 лет при хранении в поной темноте (Tuite, 1979; Kennel, Sehlin, Reinking, Spakowsky и Whittier, 1982).

Прогноз стабильности красителей при световом воздействии существенно сложнее, поскольку скорость выцветания зависит не только от уровня экспозиции (произведение освещенности фотоматериала на время выдержки), но также и от самоего уровня освещенности. Таким образом, результаты форсированных тестов на выцветание, выполненных при высоких уровнях освещенности, обязательно должны быть поверены испытаниями на низких уровнях.

Безусловно, высокая стабильность фотоматериалов прежде всего востребована в ситуациях долгосрочного показа отражающих отпечатков. Сегодня расчетное время выцветания обычных цветных фотобумаг, при условии их непрерывной демонстрации в бытовых условиях, достигает 15—20 лет (и более).

Визуальная воспринимаемость изменений, возникающих со временем в красочных изображениях, зависит от ряда факторов. Когда все три красителя обесцвечиваются синхронно и в одинаковой степени, то есть так, что хроматический баланс изображения не нарушается, изменения на 10% (и даже более) чаще всего незаметны. Но когда один

из красителей (особенно magenta) обесцвечивается больше остальных — дисбаланс бросается в глаза.

Сказанное в первую очередь касается изображений, выполненных на отражающих носителях, поскольку мы непроизвольно сравниваем эти изображения с прочими объектами поля зрения (в противоположность изображениям проекционным, рассматриваемым в темном окружении). Отметим, что частичное обесцвечивание красителей негативных фотоматериалов можно вполне успешно компенсировать при печати.

Снижение оптической плотности изображений т.н. *памятных объектов сцены* (таких, как небо, трава, нейтрально-серые предметы и, в особенности, кожа европеоидов), как правило, заметнее, чем изменения оптической плотности предметов незнакомых и/или яркоокрашенных.

14.27 ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Одной из важнейших характеристик фотопленки является ее *фотографическая чувствительность*, знание которой позволяет фотографу выбирать оптимальный уровень экспозиции.[1] Поэтому методы позиционирования фотографической чувствительности фотопленок через их характеристические кривые стали в свое время предметом международной и национальной стандартизаций (Zwick, 1979).

14.27.1 Негативные фотопленки

Одним из наиболее распространенных критериев позиционирования фотографической чувствительности негативных фотопленок (S_N) является соответствие последних следующему равенству:

$$S_N = 2.5 / \sqrt{(H_G \cdot H_S)}$$

где H_G — величина экспозиции «белым светом», дающая «зеленую» копировальную оптическую плотность на 0.15 единиц выше минимальной «зеленой» копировальной плотности; H_S — то же, но для самой плавной характеристической кривой данного фотоматериала. Величины H_G и H_S измеряются в люкс-секундах.

14.27.2 Обращаемые фотопленки

Фотографическая чувствительность обращаемых фотопленок позиционируется аналогичным образом, то есть, от пленки добиваются обеспечения ею следующего равенства:

$$S_R = 10 / \sqrt{(H_L \cdot H_S)}$$

где H_L — величина экспозиции «белым светом», дающая на 0.2 единицы большую визуальную плотность, чем плотность минимальная; H_S — величина экспозиции «белым светом», дающая визуальную плотность на 2.0 единицы большую, чем плотность минимальная (если позиция 2.0 над минимумом не достижима, H_S — это место касания

1 Величина фотографической экспозиции — это произведение освещенности поверхности пленки на время светового воздействия.

линии, соединяющей две точки на характеристической кривой по визуальной плотности, соответствующие экспозициям H_L и H_S). Величины H_L и H_S также измеряются в люкс-секундах.

14.27.3 Единицы фотографической чувствительности

Величины, полученные описанными способами, таковы, что рекомендованная экспозиция типичной (усредненной) солнечной сцены составляет $1/S_N$ или $1/S_R$ секунды при диафрагме 1/16. Фотографические чувствительности данного типа часто обозначают как «ASA» (American Standards Association) или «ISO» (International Standards Organization). Используются также и иные шкалы чувствительностей, часть из которых логарифмические (а не арифметические, как в случае S_N и S_R). Таблицу величин фотографической чувствительности, согласованных по разным шкалам, мы даем в Приложении 4.

Наконец отметим, что традиционный способ определения экспозиции (т.е. основанный на данных о фотографической чувствительности фотоматериала) некоторым сценам не подходит, к примеру: опыт фотосъемки наземных и воздушных фейерверков показал, что при чувствительности пленки в 64 ASA оптимальными для наземного варианта являются выдержка 1/30 с при диафрагме 1/2.8, тогда как для воздушного — диафрагма 1/8 (при той же выдержке).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Adelstein, P.Z., Graham, C.L., and West, L.E., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 76, 681 (1970).

American Standards Association, A.S.A. Standard PH2.17: Diffuse Reflection Density (1958).

American Standards Association, A.S.A. Standard PH2.19: Diffuse Transmission Density (1959).

American Standards Association, A.S.A. Standard PH3.37: Test method for the selective transmission of a photographic lens (1969).

Bartleson, C.J., and Breneman, E. J., Phot. Sci. Eng., 11, 254 (1967) and J. Opt. Soc. Amer., 57, 953 (1967).

Baumann, E., Phot. Sci. Eng., 24, 11 (1980).

Bermaine, D., J. Phot. Sci., 22, 84 (1974).

Brewer, W.L., Goddard, M.C., and Powers, S.A., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 64, 561 (1955).

British Standard 3824: 1964, Specification for Colour Transmission of Photographic Lenses (1964).

Clark, L.D., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 61, 241 (1953).

Dawson, G.H., and Voglesong, W.F., Phot. Sci. Eng., 17, 461 (1973).

De Mitri, C., J. Phot. Sci., 8, 220 (1960).

Eastman Kodak Co., Kodak Filters, 1970 Edn., p. 48 (1970).

Edgecombe, L.I., and Seeley, G.M., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 72, 691 (1963).

Evans, R.M., J. Opt. Soc. Amer., 33, 579 (1943).

Gale, R.O., and Williams, A.L., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 72, 804 (1963).

Giles, C.H., Forrester, S.D., Haslam, R., and Horn, R., J. Phot. Sci., 21, 19 (1973).

Giles, C.H., and Haslam, R., J. Phot. Sci., 22, 93 (1974).

Happe, L.B., J. Phot. Sci., 22, 114 (1974).

Harvey, E.A., J. Phot. Sci., 4, 130 (1956).

Hercock, R.J., and Sheldrick, G.E.A., J. Phot. Sci., 4, 113 (1956).

Hubbell, D.C., McKinney, R.G., and West, L.E., Phot. Sci. Eng., 11, 295 (1967).

Hunt, R.W.G., J. Opt. Soc. Amer., 55, 1540 (1965).
ISO, Recommendation R5: Diffuse Transmission Density, Photography (1955).
ISO, International Standard 5/3: Photography – Density Measurements – Part 3: Spectral conditions (1984).
Journal of Photographic Science, J. Phot. Sci., 36, 63–132 (1988).
Kennel, G.L., Sehlin, R.C., Reinking, F.R., Spakowsky, S.W., and Whittier, G.L., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 91, 922 (1982).
Koerner, A.M., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 63, 225 (1954).
Kozanowski, H.N., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 73, 939 (1964).
Land, E.H., Proc. Nat. Acad. Sci., 45, 115 and 636 (1959).
MacLeish, K.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 60, 696 (1953).
Marriage, A., Science and Applications of Photography, The Royal Photographic Society, London, p. 220 (1955).
Miller, O.E., and Powers, S.A., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 72, 695 (1963).
Moore, C., J. Phot. Sci., 22, 117 (1974).
Muller, J., Phot. Sci. Eng., 24, 17 (1980).
Neale, D.M., J. Phot. Sci., 4, 126 (1956).
Newhall, S.M., Nickerson, D., and Judd, D.B., J. Opt. Soc. Amer., 33, 385 (1943).
Onley, J.W., J. Opt. Soc. Amer., 50, 177 (1960).
Patterson, R., American Cinematographer, July–August (1981).
Pinney, J.E., and Voglesong, W.F., Phot. Sci. Eng., 6, 367 (1962).
Powell, P.G., J. Phot. Sci., 4, 120 (1956).
Rogers, H.G., Idelson, M., Cieciuch, R.F.W., and Bloom, S.M., J. Phot. Sci., 22, 135 (1974).
Sant, A.J., Phot. Sci. Eng., 14, 356 (1970).
Schafer, R.K., Brit. Kinematog. Sound Tel., 54, 286 (1972).
Staes, K., and Verbrugghe, R., Brit. Kinematog. Sound Tel., 53, 332 (1971).
Tuite, R.J., J. Appl. Phot. Eng., 5, 200 (1979).
Tull, A.G., J. Phot. Sci., 22, 107 (1974).
Watt, P.B., J. Phot. Sci., 4, 116 (1956).
Williams, F.C., and Clapper, F.R., J. Opt. Soc. Amer., 43, 595 (1953).
Williams, F.C., and Grum, F., Phot. Sci. Eng., 4, 113 (1960).
Zwick, D.M., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 88, 533 (1979).

ЛИТЕРАТУРА

Brewer, W.L., Goddard, M.C., and Powers, S.A., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 64, 561 (1965).
Duerr, H.H., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 54, 653 (1950).
Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, Wiley, New York (1953). Chapters XI, XII, and XIII.
Mees, C.E.K., and James, T.H., The Theory of the Photographic Process, 4th Edn., Chapters 17 and 18, Macmillan, New York (1977).
Society of Motion Picture and Television Engineers, Principles of Color Sensitometry, Society of Motion Picture and Television Engineers, New York (1963).
Syke, G., J. Phot. Sci., 4, 131 (1956).
Thomas, W., S.P.S.E. Handbook of Photographic Science and Engineering, Wiley, New York (1973).
Williams, F.C., J. Opt. Soc. Amer., 40, 104 (1950).
Williams, F.C., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 56, 1 (1951).

15 МАСКИРОВАНИЕ

15.1 ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих главах мы показали, что все виды трихроматического цветовоспроизведения «грешат» определенными неточностями и, следовательно, результирующие изображения ни в каких условиях просмотра не в состоянии воспроизвести все цветовые стимулы оригинальной сцены. Однако мы знаем, что т.н. *ментальные стандарты* (см. раздел 11.2), по которым обычно оценивается цвет элементов изображений, весьма неопределенны, благодаря чему допуски на возможные отклонения в цветовоспроизведении достаточно велики, то есть погрешности последнего часто остаются незамеченными. В определенных обстоятельствах, однако, эти погрешности могут стать явно заметными, в особенности в тех случаях, когда трихроматическое *изображение* сцены копируется с помощью тех же трихроматических методов, в частности, в субтрактивной цветной фотографии, где паразитные поглощения голубым, пурпурным и желтым красителями ведут к снижению субъективной яркости синих и зеленых элементов изображений сцен. В копиях же этих изображений синие и зеленые элементы еще больше темнеют, вплоть до того, что теряют свой хроматический компонент и превращаются в почти черные. Более того, в изображениях, выполненных на отражающих носителях, отчетливо проявляют себя издержки компрессии тонового диапазона сцены в узкий тоновый диапазон этих носителей, в частности бумаги (см. гл. 13).

Частичным решением перечисленных проблем долгое время являлся метод *маскирования*, принципы которого будут описаны как в целом, так и на примере *оптически активных краскообразующих компонент* (*оптически активных куплеров*) — основного способа реализации этих принципов. Аналогичные приемы в сфере электронной визуализации изображений и в полиграфии обсуждаются в гл. 23, 28, 29 и 32.

15.2 ТОНАЛЬНОЕ МАСКИРОВАНИЕ

В период с 1944 по 1949 гг., то есть до начала использования оптически активных краскообразующих компонент, коэффициент контрастности красочных изображений любительских фотопленок *Kodacolor* был равен 1.0, что предполагало печать на бумаге с высокой гамма. Результирующая высокая контрастность системы давала возможность воспроизводить стимулы высокой чистоты цвета. Однако контрастность результирующих изображений оказывалась чересчур большой, что вело к потере деталей в светах и тенях.

С целью компенсации столь нежелательного эффекта использовался дополнительный слой-*маска*, который поверх цветных негативных слоев образовывал позитивное черно-белое серебряное изображение с низким коэффициентом контрастности. Эффект маски состоял в том, что она прикрывала светлые области цветного негатива темным слоем серебра, не повреждая при этом теневые элементы цветного изображения. В результате коэффициент контрастности связки негатив — маска понижался, но при этом не происходило потери чистоты цвета элементов цветного изображения, поскольку у *цветных* слоев гамма оставалась по-прежнему высокой. На стадии печати требо-

валась чуть более длинная экспозиционная выдержка, но зато с помощью черно-белой маски удавалось уйти от «выбивания» светов и «провала» теней.

В дальнейшем внедрение в пленки *Kodacolor* оптически активных краскообразующих компонент (см. раздел 15.4) позволило не менее эффективно понижать их общий коэффициент контрастности, поэтому необходимость в черно-белой маске в итоге отпала.

Отметим, что сам принцип маскирования оказался на редкость прогрессивным и получил широчайшее распространение (особенно в контексте цветной печати на отражающих носителях). Сегодня эффекты маскирования успешно имитируются цифровыми системами.

15.2.1 Тональное маскирование

Принцип тонального маскирования проиллюстрирован рис. 15.1 на примере диапозитивного репродуцирования слайда, то есть ситуации, когда и оригинал, и копия — позитивы.

Кривая рис. 15.1 (a) — это характеристическая кривая (т.е., напомним, график оптической плотности как функция от десятичного логарифма экспозиции) типичной цветной обращаемой фотопленки (сплошная линия). На высоких оптических плотностях наклон кривой превышает 45°, что необходимо для получения корректной тоновой репродукции в темном окружении (см. гл. 6), то есть в ситуации проектирования слайдов при типичных уровнях паразитной подсветки. Однако поскольку в данном случае необходимо воспроизвести тона оригинального слайда без искажений, понадобится фотоматериал с коэффициентом контрастности (гамма) равным 1.0 (наклон характеристической кривой 45°), что на рис. 15.1 (a) отмечено пунктирной линией. Следовательно, если в качестве копировального выбрать тот же фотоматериал, что и оригинальный (т.е. с характеристической кривой, отмеченной сплошной линией), то все тона репродукции будут искажены (см. рис. 6.15).

Уйти от искажений позволяет тональное маскирование — для реализации метода используют низкоконтрастный негатив, получаемый контактной печатью оригинального диапозитива на специальной черно-белой пленке. После проявки негатив, то есть — маску, монтируют на оригинальном слайде, понижая тем самым его контрастность, то есть фактически выполняют почти то же самое, что сделано в негативных пленках *Kodacolor*.

На рис. 15.1 (b) дана характеристическая кривая маскирующей пленки, необходимая для получения корректной тоновой репродукции в обсуждаемой ситуации (то есть в ситуации копирования изображения со слайда на слайд-пленку с той же характеристической кривой, что и у оригинала). Данная кривая построена следующим образом: горизонтальный отрезок «*a*» (рис. 15.1 [a]), соединяющий пунктирную кривую со сплошной кривой, спроектирован на логарифмическую ось ординат графика рис. 15.1 (b). По оси абсцисс рис. 15.1 (b) отложена проекция пунктирной кривой на ось абсцисс рис. 15.1 (a).

Основанием для такого построения является то, что коль скоро экспозиция H_A гипотетического копировального материала с гамма 1.0 будет давать оптическую плотность D_A (на что указывает пунктирная линия) — уровень экспозиции через оригинал необходимо уменьшить до H'_A, дабы результирующая оптическая плотность копии была той же (то есть — D_A). Таким образом, все те участки немаскированного материала, что дадут экспозицию копировального материала H_A, должно отмаскировать до

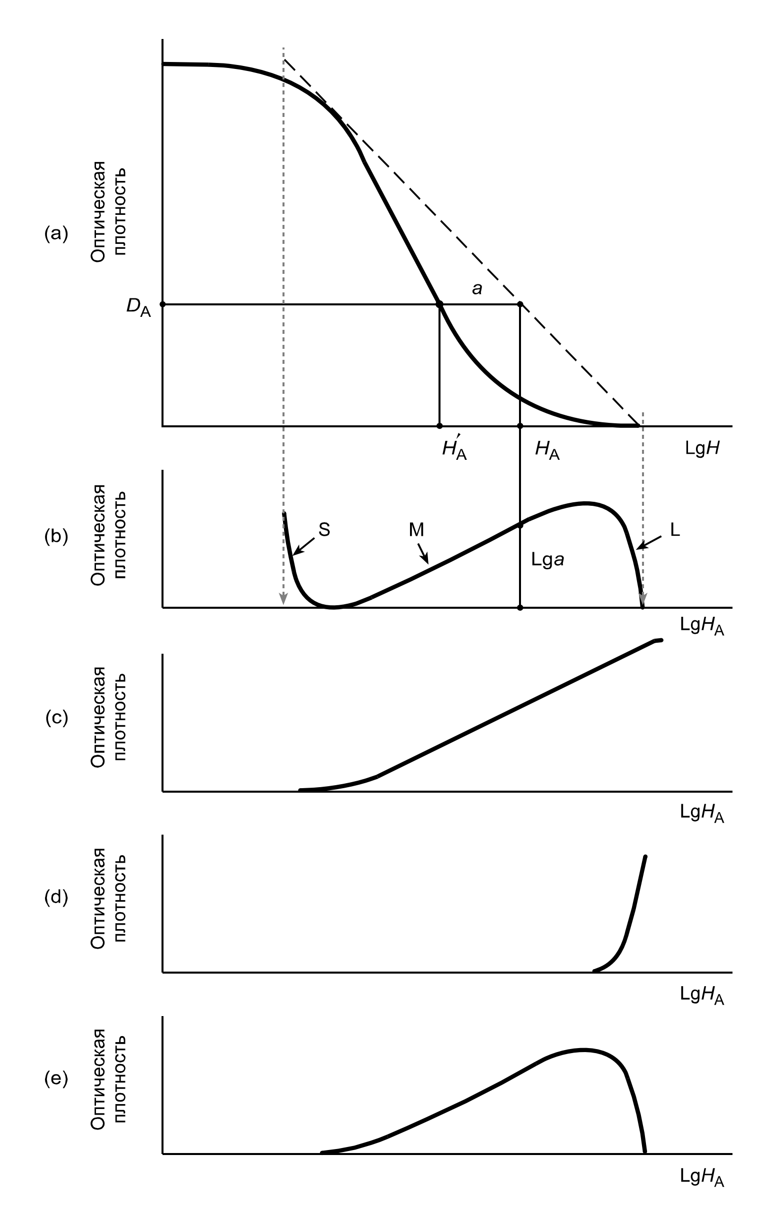


Рис. 15.1 Использование тональных масок при копировании слайд-изображения на слайд-пленку: (a) — характеристическая кривая копировального материала; (b) — характеристическая кривая идеальной маски; (c) — характеристическая кривая маски, максимально аппроксимирующей идеальную; (d) — характеристическая кривая маски высоких светов; (e) — характеристическая кривая маски, выполненной с оригинала, прикрытого маской высоких светов.

H'_A. Следовательно, все участки оригинального фотоматериала, дающие на условной копировальной пленке с гамма 1.0 оптическую плотность D_A, при копировании на обычную обращаемую фотопленку нужно увеличить по оптической плотности на $Lg(H'_A - H_A)$. Эти же рассуждения применимы ко всем возможным значениям H_A, следовательно, требуемая характеристическая кривая маски будет дана как функция от LgH_A (рис. 15.1 [b]).

Мы видим, что кривая рис. 15.1 (b) в левой своей части имеет положительный участок S, за которым следует отрицательный участок M, а потом вновь положительный

участок L. Причины того очевидны: гамма центрального фрагмента сплошной кривой рис. 15.1 (a) больше 1.0 (и, следовательно, для снижения контрастности требуется отрицательное маскирование), а подошва и плечо этой кривой имеют гамма меньше 1.0 (и, следовательно, с целью повышения контрастности требуется положительное маскирование).

Следует сказать, что фотоматериала с характеристической кривой, показанной на рис. 15.1 (b), то есть идеального маскирующего материала — не существует в принципе, хотя начальным фрагментом его кривой (S-участок), повышающим читабельность деталей в самых глубоких тенях изображения (то есть имеющим весьма слабое визуальное значение), можно смело пренебречь, не затронув при этом качества копии.

Отрицательный фрагмент (M-участок) идеальной маски можно легко воспроизвести при помощи специального негативного материала с низкой гамма (рис. 15.1 [c]). Используя такой материал сам по себе (то есть игнорируя характеристические участки S и L идеальной маски), можно существенно улучшить качество копии, однако света репродукции при этом утратят тоновые модуляции и визуально «омертвеют». Последнее ведет к заметному снижению эффектности результирующего изображения и утрате им визуальной «воздушности». Следовательно, наряду с отрицательным фрагментом (M-участок) в маске должен присутствовать и положительный участок L.

Положительный L-участок можно воспроизвести только за счет более сложной процедуры, включающей в себя этап т.н. *маскирования высоких светов*. Если маскирование высоких светов не выполняется, степень утраты ими тоновых модуляций можно понизить, то есть добиться того, чтобы высокие света оригинального слайда «сели» на плечо характеристической кривой маскирующего материала, за счет гиперэкспозиции M-маски. При этом, даже несмотря на снижение контрастности высоких светов изображения из-за низкой контрастности копировального материала в верхней части его тонового диапазона (напомним, что в нашем случае в качестве копировального выступает обращаемая фотопленка с теми же характеристиками, что и пленка оригинальная), M-маска не допустит *неприемлемого* снижения визуальной контрастности высоких светов (но не более того). Отметим, что данный метод, получивший название *шолдеризации* (т.е. «посадки на плечо»), весьма и весьма практичен. Однако же для полной компенсации падения контрастности светов в результирующем изображении должен применяться метод отдельного маскирования высоких светов (см. ниже).

В пленках *Kodacolor* первого поколения черно-белый маскирующий слой был расположен поверх красночувствительного и зеленочувствительного слоев (то есть поверх голубого и пурпурного красочных изображений), но при этом снизу от синечувствительного слоя (то есть ниже желтого красочного изображения). Масочный слой был сенсибилизирован к свету только коротковолновой («синей») части спектра и, следовательно, при экспонировании обработанного негатива через подложку белым светом на фотобумагу влияние паразитных поглощений голубым и пурпурным красителями в «синей» части спектра резко уменьшалось. Таким образом, маска была эквивалентна низкоконтрастному позитивному изображению *сцены*, полученному через желтый фильтр (Neblette, 1962).

15.2.2 Маскирование высоких светов

Маскирование высоких светов выполняется путем контактной печати оригинального слайда на черно-белый негативный материал с высоким коэффициентом контрастности (рис. 15.1 [d]). При этом используются достаточно короткие экспозиционные

выдержки, дабы на маске зафиксировались только светлые элементы оригинального изображения. Маска монтируется на оригинальный слайд, после чего связка экспонируется на М-маскирующий материал (то есть материал, обладающий характеристиками, показанными на рис. 15.1 [c]).

М-маскирующий материал, будучи негативным, инвертирует отрицательную кривую маски светов (рис. 15.1 [d]) в положительную кривую, показанную на рис. 15.1(e). После чего маска светов удаляется с оригинального изображения, на которое, в свою очередь, монтируется маска, полученная только что описанным способом. Маскированный таким образом оригинальный слайд экспонируется контактным способом на слайд-пленку с аналогичными характеристиками (отмечены на рис. 15.1 [a] сплошной линией).

Стоит сказать, что описанная методика хоть и трудоемка, но в ситуациях, когда необходима высококачественная копия слайда, — исключительно эффективна.

15.2.3 Маскирование паразитных поглощений

Как было показано в начале текущей главы, паразитные поглощения cyan-, magenta- и yellow-красителями в фотографическом цветорепродукционном процессе возникают дважды, в результате чего синие и зеленые стимулы воспроизводятся неприемлемо темными. Несколько уменьшить степень этого затемнения можно с помощью описанной выше негативной М-маски, изготовленной через красный, оранжевый или желтый фильтры. Оптические плотности такой маски соответственно по красным, оранжевым или желтым областям изображения будут выше, чем оптические плотности по синим и зеленым областям. Следовательно, в маскированном оригинале синие и зеленые элементы будут светлее красных, оранжевых или желтых. Таким образом, в копии синие и зеленые элементы изображения окажутся светлее, чем при маске, изготовленной без какого-либо из упомянутых фильтров. Описанный метод подчас оказывается очень эффективным.

15.3 НЕРЕЗКИЕ МАСКИ

Дж. Юл (Kodak Research Laboratories) в свое время отметил еще одно полезное свойство маскирования (Yule, 1944) и предложил изготавливать маски путем экспонирования оригинала через тонкий зазор между слайдом и маскирующим материалом (за счет чего изображение на последнем теряло резкость). Дело в том, что точная приводка маски на оригинале крайне затруднительна, и поскольку она всегда выполняется не идеально, то вокруг четко обозначенных краев элементов изображения появляется заметный ореол. За счет зазора юлова маска получалась нерезкой, благодаря чему удавалось не только скрыть легкие недочеты ее приводки на оригинале, но и улучшить воспроизведение тонких деталей изображения: мы помним, что негативная маска в целом понижает контрастность репродукции, а мелкие детали читаются лучше, когда воспроизводятся с высокой контрастностью, — при использовании же нерезкой маски тонкие детали не пропадают, поскольку нерезкая маска, смонтированная на слайд-оригинале, понижает контрастность крупных областей изображения, не понижая ее у мелких деталей (см. рис. 29.6).

Отметим, что использование нерезких масок и масок контрастности ведет к некоторой гиперкоррекции тонов изображения, что (в сочетании с иными приемами) в свое время позволило Ральфу Эвансу (Kodak Research Laboratories) получить на гидротип-

ной системе *Kodak Dye Transfer* репродукции, оказавшиеся ближе к сюрреалистичным живописным полотнам, нежели к фотографиям (Evans, 1951 и 1954) (хотя, разумеется, фотографические методы использовались повсеместно). «Репродукции» Эванса были названы «изополихромными», а сам прием — «изополихромией» (см. рис. 15.2).

15.4 ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ КУПЛЕРЫ

Черно-белые маски, использовавшиеся в пленках *Kodacolor* первого поколения, позволяли поднять колориметрическую чистоту элементов изображения за счет роста общей контрастности системы, не нарушая при этом тонопередачи красочных изображений, но слегка корректируя паразитные поглощения у пурпурного и голубого красителей. Однако в 1948 г. в профессиональных пленках (*Ektacolor*), а в 1949 г. — в любительских (*Kodacolor*), стал использоваться новый и весьма изящный метод компенсации этих поглощений, основанный на использовании не бесцветных, а *окрашенных* (*оптически активных*) краскообразующих компонент.

Компоненты окрашены так, что после образования красителей спектральный коэффициент пропускания в областях их паразитного поглощения остается неизменным (то есть не зависит от концентрации красителя в слоях. — *Прим. пер.*). С переходом на оптически активные краскообразующие компоненты неэкспонированные области обработанных фотопленок стали выглядеть оранжевыми (см. рис. 12.8), однако самоя идея маскирования с помощью оптически активных куплеров оказалась невероятно прогрессивной. Принципы ее воплощения мы рассмотрим ниже.

Фотографическая эффективность цветного негатива зависит от способности красителей создавать три негативных красочных изображения, легко разделяемых оптически. То есть критично то, чтобы красители каждого из типов поглощали свет только в «своем» участке видимого спектра, хорошо отделенном от двух других участков. Однако кривые спектральных коэффициентов пропускания классических голубого (cyan), пурпурного (magenta) и желтого (yellow) красителей будут аналогичны кривым, показанным на рис. 4.1, что указывает на паразитные поглощения этими красителями световой энергии в средневолновой («зеленой») и коротковолновой («синей») частях спектра.

К сожалению, сей дефект свойственен не одним лишь голубым, пурпурным и желтым красителям — подавляющее большинство оптически активных веществ имеет добавочные поглощения на коротковолновой стороне своей основной спектральной полосы, так что даже в таком эксклюзивном случае, как набор, представленный инфракраснопоглощающим, зеленопоглощающим (magenta) и ультрафиолетопоглощающим красителями, — описанная проблема остается.

Однако вернемся к окрашенным куплерам. Главное достоинство оптически активных краскообразующих компонент состоит в том, что они весьма изящным и простым образом позволяют справиться с эффектами паразитных поглощений (Hanson, 1950). Любопытно, что первенство в использовании оптически активных краскообразующих компонент принадлежит одновременно Научным лабораториям Eastman Kodak Company и Ansco Corporation (более того, компании зарегистрировали первые патенты в один и тот же день!). В первом случае профессор В.Т. Хэнсон (W.T. Hanson) подал самою идею, успешное воплощение которой стало возможным только после периода интенсивных исследований; во втором — была случайно синтезирована краскообразую-





Рис. 15.2 Два примера изополихромии (см. раздел 15.3): используя лишь фотографические приемы, такие как маскирование, подсветка и инверсия, можно получить широчайший диапазон эффектов, подобных тем, каких добиваются с помощью компьютеров. Материалы любезно предоставлены Ричардом Тюкером (Richard Tucker, F.R.P.S.).

щая компонента, оказавшаяся окрашенной, что по воле Провидения привело в итоге к тому же самому открытию.

15.4.1 Принцип действия окрашенных куплеров

Принцип работы оптически активных краскообразующих компонент схематично показан на рис. 15.3 и 15.4.

15.4.1.2 Окрашенный куплер идеального magenta-красителя

Предположим, что в цветном негативе magenta-краситель присутствует в максимальной концентрации (m), при этом его коэффициенты пропускания по «красной», «зеленой» и «синей» частям спектра равны соответственно 100%, 5% и 50% (линия «A» на рис. 15.3 [a]).

Для удобства рассуждений допустим, что речь идет о magenta-красителе, идеальном во всех отношениях за исключением равномерного паразитного поглощения в «синей» части спектра. Линии B, C, D, E, и F рис. 15.3 (a) демонстрируют спектральные коэффициенты пропускания этого красителя в концентрациях $3/4m$, $1/2m$, $1/4m$, $1/8m$ и 0 соответственно. Предположим также, что magenta-краситель образовался в одном из слоев фотопленки из соответствующей компоненты в результате цветного проявления.

Если допустить, что концентрация куплера до проявки пленки была равна величине c, то оставшиеся концентрации после проявки будут равны соответственно: 0, $1/4c$, $1/2c$, $3/4c$, $7/8c$ и c.

Теперь предположим, что краскообразующая компонента не прозрачна, но окрашена в желтый, то есть в c-концентрации имеет спектральные коэффициенты пропускания по «красной», «зеленой» и «синей» областям спектра соответственно 100%, 100% и 50%. После проявки и превращения ее в magenta-краситель «желтый» компонент красочного изображения будет тем слабее, чем выше концентрация красителя, а спектральный коэффициент пропускания неизрасходованного куплера на A-, B-, C-, D-, E-, и F-уровнях концентрации красителя будет таким, как показан на рис. 15.3 (b).

Общие кривые спектрального коэффициента пропускания эмульсионного слоя рис. 15.3 (c) получены за счет попарного объединения соответствующих кривых рис. 15.3 (a) и 15.3 (b). Мы видим, что спектральный коэффициент пропускания в коротковолновой («синей») части спектра остался неизменным:

— когда magenta-красителя нет совсем, то спектральный коэффициент пропускания самой краскообразующей компоненты равен 50% по всем длинам волн «синей» части спектра (позиция «F» на рис. 15.3 [b]);

— когда все куплеры эмульсионного слоя израсходованы (т.е. когда концентрация красителя достигла возможного максимума) и дальнейший рост светопоглощения прекратился — спектральный коэффициент пропускания magenta-красителя в «синей» части остается равным 50% (позиция «F» на рис. 15.3 [c]);

— на всех промежуточных этапах спектральный коэффициент пропускания куплера по «синей» части спектра, умноженный на спектральный коэффициент пропускания красителя по той же спектральной области, также остается равным 50%.

Последнее требует пояснения: если на любом промежуточном уровне концентрации красителя долю краскообразующей компоненты принять за n, ее спектральный коэффициент пропускания будет равен $(50/100)^n$; спектральный коэффициент пропускания красителя соответственно — $(50/100)^{1-n}$. Следовательно, спектральный коэффициент

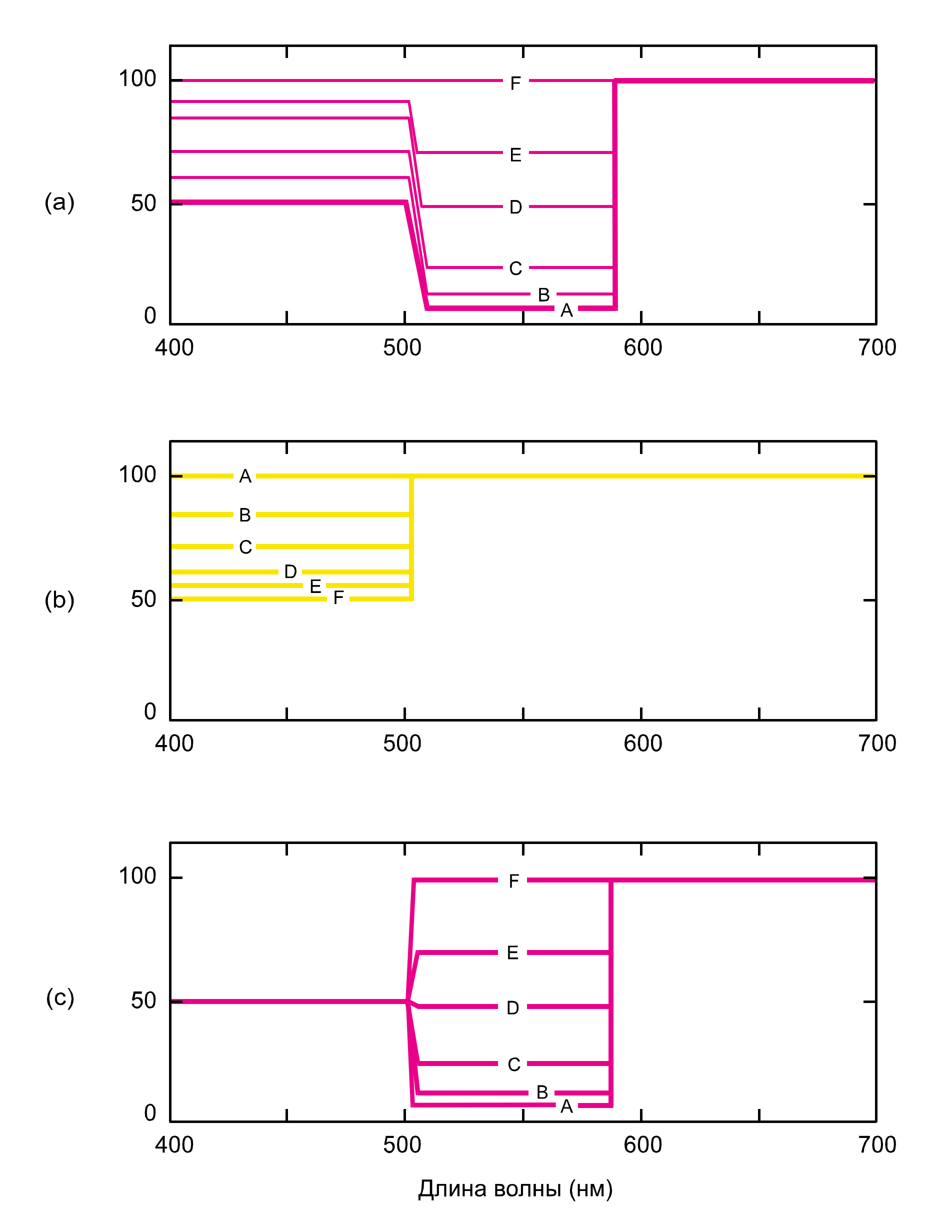


Рис. 15.3 Схематичная иллюстрация работы идеальной magenta-образующей оптически активной (окрашенной) компоненты: (a) — кривая спектрального коэффициента пропускания magenta-красителя при различных концентрациях; (b) — кривая спектрального коэффициента пропускания идеальной magenta-образующей окрашенной компоненты; (c) — комбинированная кривая.

пропускания комбинации куплера с красителем равен $(50/100)^n \times (50/100)^{1-n}$, то есть 50/100. (Напомним, что мы говорим об идеальных красителях).

Понятно, что основное назначение данного эмульсионного слоя состоит в управлении коэффициентом пропускания фотоматериала в «зеленой» части видимого спектра при условии полной интактности в отношении его «красной» и «синей» частей (коэффициент пропускания которых остается фиксированным соответственно на уровне 100% и 50%). Низкий уровень пропускания по «синей» части спектра можно легко компенсировать удвоенным количеством «синего» компонента света лампы фотоувеличителя. Таким образом, magenta-краситель и его желтая краскообразующая компо-

нента образуют систему, управляющую экспозицией света исключительно «зеленой» части спектра. Следовательно, с фотографической точки зрения, эффект паразитного поглощения magenta-красителем полностью устраняется.

15.4.1.3 Окрашенный куплер идеального cyan-красителя

Розовый куплер, из которого (при его взаимодействии с окисленным цветным проявляющим веществом) в другом эмульсионном слое образуется cyan-краситель, сходным образом устраняет эффекты паразитных «зеленого» и «синего» поглощений этим красителем. Механизм, которым сие достигается, показан на рис. 15.4. Отметим, что опять же для удобства и простоты объяснения на рис. 15.4 (a) показана кривая спектрального коэффициента пропускания cyan-красителя, идеального во всех отношениях, за исключением лишь того, что по «зеленой» и «синей» частям спектра у красителя имеются равномерные паразитные поглощения (A-линия относится к максимальной концентрации красителя). Коэффициенты пропускания по «красной», «зеленой» и «синей» областям спектра равны соответственно 5% , 30% и 40% . Остальные линии аналогичны таковым на рис. 15.3 (a).

Предположим, что краскообразующая компонента cyan-красителя в максимальной концентрации при белом свете имеет розовую окраску, то есть коэффициенты пропускания по «красной», «зеленой» и «синей» областям спектра равны 100% , 30% и 40% соответственно (рис. 15.4 [b]). Когда данный куплер присутствует в красночувствительном слое эмульсии наряду с cyan-красителем, образовавшимся после цветного проявления, кривые спектрального коэффициента пропускания этого слоя при разных концентрациях красителя будут такими, как показаны на рис. 15.4 (c). Вновь мы наблюдаем, что в отличие от паразитных поглощений немаскированного материала, паразитные поглощения маскированного — константны. Следовательно, при манипуляции долями «зеленого» (коэффициент 100/30) и «синего» (коэффициент 100/40) компонентов в спектре света фотоувеличителя, результирующий эффект от данного эмульсионного слоя будет состоять в управлении коэффициентом пропускания фотоматериала по «красной» части видимого спектра.

15.4.1.4 Окрашенные куплеры реальных красителей

На практике коэффициенты пропускания фактических (не идеальных) красителей и краскообразующих компонент, для простоты рассуждений объявленные нами константными (рис. 15.3 [c] и рис. 15.4 [c]), на деле лишь относительно постоянны. Однако сие вряд ли умаляет ценность самоей идеи маскирования вообще и оптически активными компонентами в частности. Фактически, позволив этим коэффициентам расти (по мере роста концентрации красителей) за счет интенсивно окрашенных куплеров, паразитные поглощения голубым и пурпурным красителями фотобумаг можно компенсировать в той же мере, что и паразитные поглощения красителями негативов.

На рис. 15.5 даны кривые спектральных коэффициентов пропускания фактической фотопленки, в которой паразитные поглощения в «синей» части спектра magenta-красителем компенсированы за счет окрашенного куплера с примесью неокрашенного. Кривую спектрального коэффициента пропускания можно изменить с той целью, чтобы при росте экспозиции печати по той спектральной области, где куплер поглощает, получить *эквивалентные красители* для каждой из возможных систем маскирования (Sant, 1961; Watson, 1966).

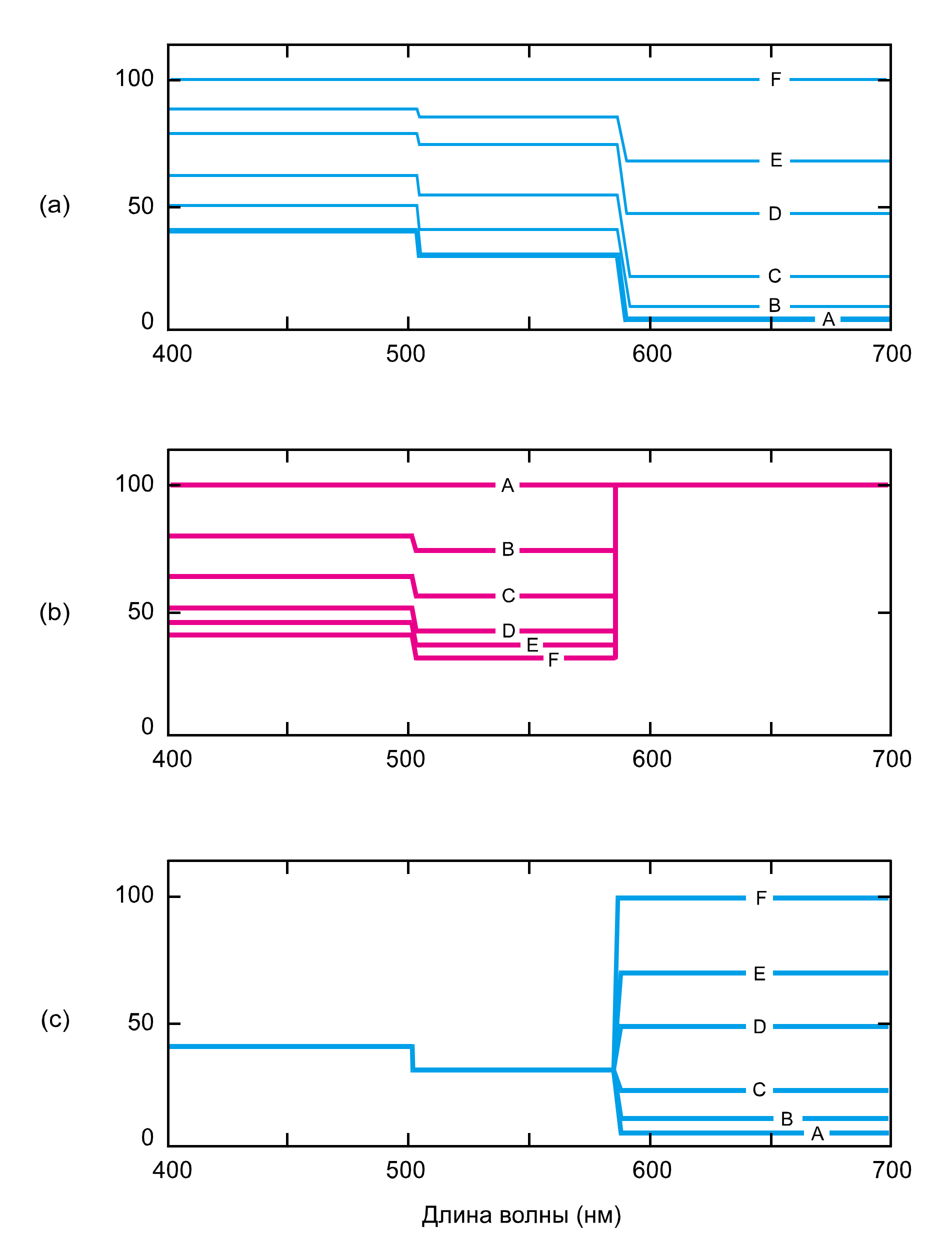


Рис. 15.4 Схематичная иллюстрация работы идеальной cyan-образующей оптически активной (окрашенной) компоненты: (a) — кривая спектрального коэффициента пропускания cyan-красителя при различных концентрациях; (b) — кривая спектрального коэффициента пропускания идеальной cyan-образующей окрашенной компоненты; (c) — комбинированная кривая.

15.4.1.5 Область применения

В заключение раздела стоит сказать, что внедрение оптически активных краскообразующих компонент в цветную фотографию — это колоссальный шаг в ее технологическом развитии, приведший к широчайшему распространению цветных негативов, причем не только в секторе любительских фото, но и в профессиональном цветном кинематографе, в котором позитивные копии по сей день массово тиражируются контактным способом (см. раздел 12.11 и рис. 12.8).

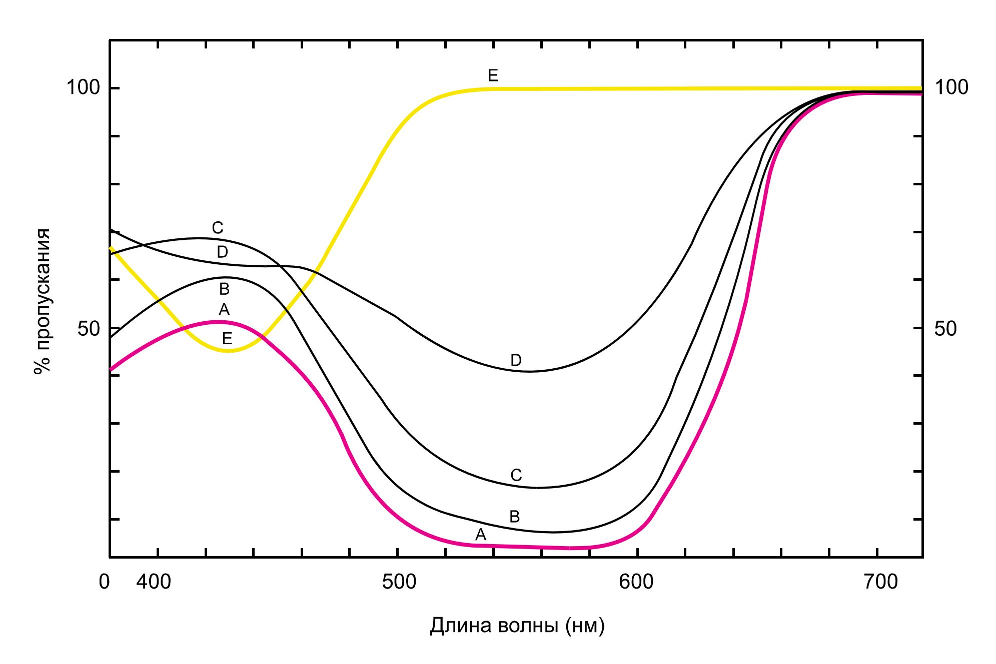


Рис. 15.5 Кривые спектральных коэффициентов пропускания желтоокрашенной magenta-образующей компоненты (Е) и magenta-красителя, образованного смесью этой компоненты с бесцветной magenta-образующей компонентной (А). Кривые В, С и D представляют спектральные коэффициенты пропускания фотоматериала на разных стадиях реакции образования красителя.

15.5 МЕЖСЛОЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Оптически активные краскообразующие компоненты (окрашенные куплеры), к сожалению, можно внедрять лишь в те фотоматериалы, что предназначены к дальнейшему копированию (печать, дуплицирование), поскольку присутствие окрашенных куплеров в светах изображений дает выраженный оранжевый сдвиг, некомпенсируемый адаптацией зрения. Именно по этой причине оптически активные краскообразующие компоненты не используются в обычных обращаемых фотопленках, то есть пленках, ориентированных на просмотр. Высокой красочности и «воздушности» последних добиваются (как минимум, отчасти) за счет т.н. *межслойных эффектов*, обеспечивающих тот же результат, что и оптически активные куплеры, но принципиально иным способом (Hanson и Horton, 1952; Barr, Thirtle и Vittum, 1969).

15.5.1 Полезные межслойные эффекты

Наличие в фотоматериалах репродукционно полезных межслойных взаимодействий можно доказать разными способами. Рассмотрим один из них, обратившись к рис. 15.6 (а), где на примере обращаемых фотопленок соответствующие аналитические оптические плотности даны как функция от концентрации cyan-красителя (точнее, от десятичного логарифма экспозиции красночувствительного слоя).

Кривая «N» демонстрирует функцию выхода cyan-красителя в изображении серой шкалы, полученного суммарной экспозицией по «красной», «зеленой» и «синей» областям видимого спектра (т.н. «нейтральная» экспозиция). Кривая «R» — выход cyan-красителя, но в результате строго «красной» экспозиции. Поскольку кривая «R»

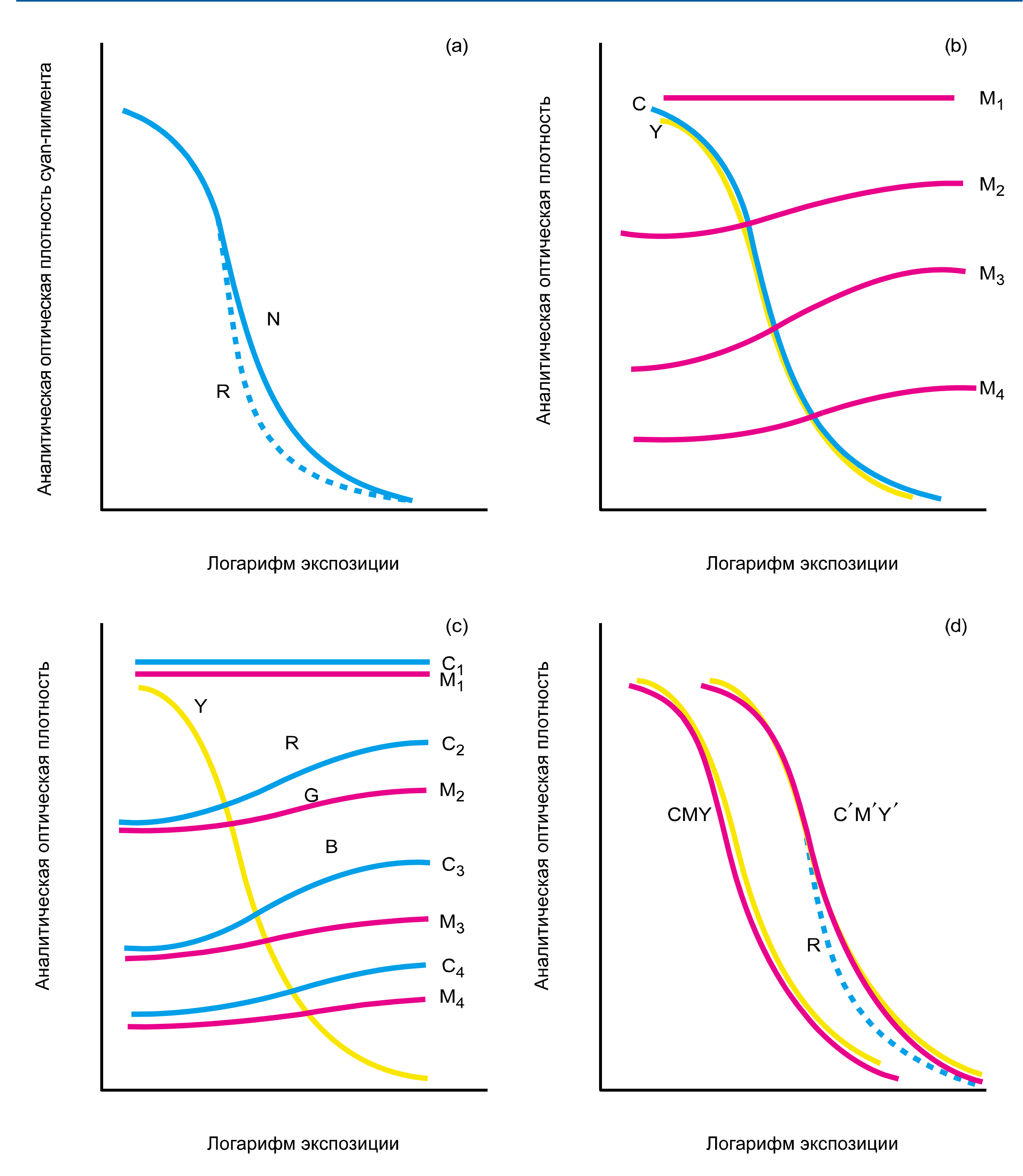


Рис. 15.6 Четыре примера межслойных взаимодействий (межслойных эффектов).

отлична от кривой «N», можно сделать вывод о том, что наличие/отсутствие экспозиции по остальным слоям влияет на выход cyan-красителя. Мы видим, что при «красной» экспозиции cyan-красителя образуется меньше (кривая «R»), чем при «нейтральной» (кривая «N»), следствием чего явится бóльшая фотометрическая яркость красных элементов изображения и, соответственно, бóльшая их светлота. По оставшимся двум слоям (зеленочувствительному — управляющий magenta-краситель и синечувствительному — управляющий yellow-краситель) рассуждения те же.

На рис. 15.6 (b) даны аналитические оптические плотности полной тройки красителей, получившиеся при градиентной экспозиции красночувствительного (красный клин) и синечувствительного слоев (синий клин), но при равномерной экспозиции зеленочувствительного слоя на разных уровнях этой экспозиции. Нелинейность и наклон кривых M_1, M_2, M_3 и M_4, указывающие на различия в выходе magenta-красителя, являются следствием межслойного эффекта, поскольку, как мы помним, экспозиция «зеленым» компонентом света — равномерна. Отметим, что кривые «C» и «Y» должны были бы при этом слегка сдвигаться вдоль оси десятичных логарифмов экспозиции за счет встречного влияния magenta-красителя, но для простоты объяснения эти кривые оставлены нетронутыми. Аналогичные кривые можно построить для случаев равномерной экспозиции красночувствительного и синечувствительного слоев.

На рис. 15.6 (c) дано то же, что и на рис. 15.6 (b), но при градиентной экспозиции синечувствительного слоя и одновременной равномерной экспозиции красно- и зеленочувствительного слоев. Нелинейность и наклон C- и M-кривых указывают на межслойные взаимодействия. Понятно, что Y-кривая смещается вдоль оси абсцисс, но для удобства сие опять опущено. Аналогичные графики можно построить для случаев градиентной экспозиции зеленочувствительного и красночувствительного слоев.

На рис. 15.6 (d) показан результат двойного экспонирования:

— вначале на двух различных уровнях была выполнена экспозиция серой шкалы, в результате чего на слайде получены два серых клина (кривые C, M, Y и C′, M′, Y′, которые для удобства совмещены друг с другом в каждой тройке);

— затем выполнена экспозиция красной шкалы, причем по «синей» и «зеленой» зонам спектра эта экспозиция проведена на CMY-уровне, а по «красной» на уровне C′M′Y′.

При отсутствии межслойных эффектов результат будет представлен кривыми M, Y и C′, тогда как при их наличии cyan-кривая под красной шкалой будет представлять собой кривую R вместо C′, и разрыв между ними укажет на степень межслойного эффекта по выходу cyan-красителя.

Если данные рис. 15.6 (b) и 15.6 (c) графически отобразить с использованием *интегральных оптических плотностей*, то любое отсутствие искривления относительно горизонталей укажет либо на отсутствие паразитных поглощений при одновременном отсутствии межслойных эффектов, либо же на то, что паразитное поглощение было идеально компенсировано межслойным эффектом.

Межслойные эффекты обязательно заявят о себе, если интенсивности проявки смежных слоев фотоматериала окажутся различными. Последнее вызвано рядом причин, в том числе тем, что проявитель по мере проникновения вглубь многослойного цветного фотоматериала постепенно расходуется, и к моменту достижения нижнего слоя его активность оказывается сниженной. Следовательно, коль скоро для получения сбалансированной серой шкалы требуется, чтобы проявитель был одинаково активен во всех слоях фотоматериала, последний следует изготавливать так, чтобы его нижний слой обладал заведомо меньшей (или большей) контрастностью, чем два других слоя.

Однако когда экспонируется один только нижний слой (то есть в случае регистрации фотоматериалом с традиционной последовательностью слоев высокочистого красного стимула), проявитель не может оказаться частично израсходованным, поскольку в двух вышележащих слоях практически отсутствует проявление. Следовательно, фотографическая чувствительность красночувствительного слоя будет выше к длинноволновым стимулам, нежели к спектрально-равномерным (серым), соответственно вырастет и контрастность cyan-изображения, что показано на рис. 15.6 (a) и (b). Сие ве-

дет к увеличению коэффициента пропускания красочного суan-изображения по «красной» части видимого спектра и, как следствие, повышению фотометрической яркости и колориметрической чистоты красных элементов изображения (то есть росту их светлоты и чистоты цвета в сравнении со всеми прочими экспозиционными ситуациями).

Наконец отметим, что межслойные эффекты в многослойных фотоматериалах можно инициировать т.н. *веществами — ингибиторами проявления* (*ингибиторами*), диффундирующими из соседних слоев и влияющих на интенсивность проявления в слое интересующем. В качестве ингибиторов могут выступать анионы брома или йода, или же специальные вещества, выделяющиеся из т.н. *DIR-куплеров* (*DIR-краскообразующих компонент*). DIR — это аббревиатура, означающая *Development Inhibitor Releasing* — высвобождение веществ, подавляющих проявление (Barr, Thirtle и Vittum, 1969; Meissner, 1969; Tull, 1975) (см. раздел 17.11).

15.5.2 Паразитные межслойные эффекты

Наряду с полезными в слоях цветных фотоматериалов могут возникать и *паразитные межслойные эффекты*, наносящие цветовоспроизведению очевидный вред. К примеру, если окисленное проявляющее вещество перемещается от слоя к слою фотоматериала с внедренными краскообразующими компонентами, красители начинают образовываться не там, где следует, и в неадекватных количествах (что, разумеется, искажает результаты цветовоспроизведения). В цветных многослойных материалах дефекты такого типа минимизируют, как правило, с помощью тонких межслойных перегородок, содержащих вещества, абсорбирующие или иммобилизирующие окисленное проявляющее вещество.

Еще один паразитный эффект возникает тогда, когда переэкспонирование одного из светочувствительных слоев активирует проявление в соседнем: на рис. 15.6 (b) и (c) сие отмечено деформацией правого конца кривой «M», а также кривой «C» на рис. 15.6 (c). От таких явлений можно уйти, выбрав эмульсию, нечувствительную к т.н. *вуалированию*, которое, как мы уже сказали, случается из-за интенсивного проявления в соседних слоях фотоматериала (или слое).

Экспонирование зелено- и красночувствительных слоев «синим» компонентом световой энергии — т.н. *пробóй*, возникающий из-за недостаточности желтого фильтрового слоя, также можно отнести к паразитному межслойному эффекту.

15.6 МАСКИРОВАНИЕ СЕПАРАЦИЙ

В тех случаях, когда использование оптически активных краскообразующих компонент невозможно, некоторую коррекцию паразитных поглощений голубым, пурпурным и желтым красителями все-таки можно выполнить, как мы знаем, за счет применения масок, изготовленных путем экспонирования маскирующего материала через соответствующие фильтры. Более того, в системах, в которых изображение фиксируется за красным, зеленым и синим фильтрами, маскирование может дать полную коррекцию паразитных поглощений, а также некоторых иных дефектов цветовоспроизведения. Сказанное было актуальным в основном в полиграфии (при изготовлении печатных форм), однако изучение самоего принципа компенсации паразитных поглощений на стадии изготовления сепараций весьма интересно вообще и в приложении к сканирующим системам в частности.

15.6.1 Маскирование оригинала при изготовлении негативной сепарации за синим фильтром

Предположим, что мы хотим компенсировать паразитное поглощение фотографическим magenta-красителем (или типографской краской) при цветовоспроизведении со слайд-оригинала. Предположим также, что мы используем процесс, в котором три сепарированных негатива выполняются путем контактной печати (или фотоувеличения) этого оригинала через красный, зеленый и синий фильтры на специальный черно-белый негативный фотоматериал.

Если бы представлялось возможным воспроизвести репродукцию с помощью идеального magenta-красителя, то есть красителя, не имеющего паразитных поглощений, то такое изображение при рассматривании через синий и красный фильтры оказалось бы невидимым. Однако изображения, построенные реальным magenta-красителем, при рассматривании через красный фильтр все же будут слегка угадываться, а при рассматривании через синий фильтр окажутся вполне различимы (за счет паразитного поглощения magenta-красителем в коротковолновой [«синей»] части видимого спектра).

Таким образом, изображение, сформированное реальным magenta-красителем, может условно рассматриваться нами как полноконтрастное изображение, созданное идеальным magenta-красителем в совокупности с низкоконтрастным паразитным «желтым» изображением, инициированным паразитным поглощением.

У большинства изображений во всех областях (кроме белых) в определенных количествах присутствуют все три красителя, поэтому чаще всего желтое репродукционное изображение по каждой его точке можно ослабить на величину, равную паразитному «желтому» изображению, компенсировав тем самым эффект паразитного поглощения magenta-красителем в «синей» части видимого спектра. Ниже мы рассмотрим схему реализации описанного принципа.

Первый этап. Цветной слайд печатается через зеленый фильтр (то есть экспонирование выполняется зеленым светом) на черно-белом негативном фотоматериале с низким коэффициентом контрастности. Изготавливаемая таким способом маска фиксирует в основном те стимулы, интенсивность которых в оригинале регулируется magenta-красителем, и приблизительно отображает то, как будет распределен magenta-краситель в репродукции. Поскольку маска представляет собой черно-белый *негатив*, на тех участках, что соответствуют большей концентрации magenta-красителя в оригинале, он будет обладать большей пропускательной способностью (т.е. будет светлее на просвет) и наоборот.

Второй этап. Маска с максимально точной приводкой монтируется на оригинал, дабы, затемнив участки низкой концентрации magenta-красителя, высветлить участки его высокой концентрации.

Несмотря на то что целью маскирования является компенсация паразитного поглощения magenta-красителем в «синей» части спектра, обсуждаемая маска не используется при изготовлении magenta-сепарации — она задействуется только при создании негативной сепарации за *синим* фильтром (yellow-сепарации). Причина сего в том, что коль скоро паразитное поглощение magenta-красителем — это поглощение в «синей» части спектра, компенсировать его можно только за счет ослабления желтого красочного изображения, и, следовательно, накладываться маска должна на ту сепарацию, которая управляет выходом желтого красителя в копии.

Использовав описанную маску при изготовлении сепарации за синим фильтром, мы условно добавляем к слайду низкоконтрастное yellow-изображение, и, следова-

тельно, позитивное желтое красочное изображение репродукции (полученное с результирующей негативной yellow-сепарации) будет ослаблено по тем точкам, где концентрация magenta-красителя должна быть высокой, и нетронутым в тех точках, где magenta-краситель должен отсутствовать.

Понятно, что сходных результатов можно добиться за счет маскирования самой негативной сепарации (а не слайда), однако в этом случае маска должна быть позитивной.

Описанным путем, при правильном выборе коэффициента контрастности маскирующего материала, эффект паразитного поглощения можно полностью компенсировать.

15.6.2 Расчет коэффициента контрастности маскирующего материала

Когда речь идет о компенсации паразитного поглощения только одним красителем, выбор правильного значения гамма маскирующего материала очень прост. К примеру, если отношение оптической плотности в зоне паразитного «синего» поглощения к оптической плотности в зоне полезного «зеленого» у magenta-красителя обозначить как m_B/m, а коэффициент контрастности репродукционного magenta-изображения — γ_m, то гамма маски должна быть такой, чтобы основное желтое изображение репродукции, совмещенное с этой маской, имело коэффициент контрастности, равный $(m_B/m)/\gamma_m$.

Если гамма основного желтого изображения равна γ_y, то гамма маски, накладываемой на негативную yellow-сепарацию, должна быть равна $(m_B/m)/(\gamma_m/\gamma_Y)$, однако, если маска накладывается на оригинальный слайд (то есть используется при *изготовлении* этой сепарации), она должна иметь коэффициент контрастности, равный $(m_B/m)/(\gamma_m/\gamma_Y)\gamma_B$, где γ_B — гамма негативного материала, использованного для изготовления yellow-сепарации.

Общая гамма маскирующей системы (то есть коэффициент контрастности оригинального изображения за зеленым фильтром, умноженный на гамма маскирующего материала) должна быть равна отношению $(m_B/m)/(\gamma_m/\gamma_Y)\gamma_B$ к γ_t (гамма оригинального слайда за зеленым фильтром). Полученное значение, следовательно, зависит не только от способа использования маски, но также от способа ее *изготовления*: когда маска выполняется не со слайда за зеленым фильтром, а с негативной magenta-сепарации, — значение гамма будет иным.

На рис. 15.7 дана таблица уравнений расчета оптимального значения коэффициента контрастности маскирующего материала при разных вариантах маскирования.

Когда паразитное «синее» поглощение magenta-красителем — это единственное паразитное поглощение во всей цветорепродукционной системе, и при этом общая контрастность репродукции должна быть такой же, как контрастность оригинального слайда, вышеприведенные уравнения упрощаются («Частный случай» на рис. 15.7), поскольку: $\gamma_B\gamma_y = 1$; $\gamma_G\gamma_m = 1$; $\gamma_t = \gamma_m$.

15.7 МАСКИРОВАНИЕ ПРИ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОМ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИИ

В первой половине прошлого века американский исследователь Дж. Юл (Kodak Research Laboratories), изучал вопрос возможности получения колориметрически точной цветовой репродукции оригинального *изображения* сцены (см. раздел 11.5) с

Маска выполнена:	Маска установлена на:	Коэффициент контрастности (γ) маскирующего материала	
		Общий случай	Частный случай (упрощенный)
со слайда через зеленый фильтр	«синей» сепарации	$\frac{+(m_B/m)(\gamma_m/\gamma_y)}{\gamma_t}$	$\frac{+(m_B/m)}{\gamma_y}$
со слайда через зеленый фильтр	слайде при создании «синей» сепарации	$\frac{-(m_B/m)(\gamma_m/\gamma_y)}{\gamma_t\gamma_B}$	$-(m_B/m)$
с «зеленой» негативной сепарации	«синей» сепарации	$\frac{-(m_B/m)(\gamma_m/\gamma_y)}{\gamma_t\gamma_G}$	$\frac{-(m_B/m)}{\gamma_t\gamma_G}$
с «зеленой» негативной сепарации	слайде при создании «синей» сепарации	$\frac{+(m_B/m)(\gamma_m/\gamma_y)}{\gamma_t\gamma_G\gamma_B}$	$\frac{+(m_B/m)}{\gamma_G}$

Рис. 15.7 Коэффициенты контрастности фотоматериалов, необходимые для компенсации паразитного поглощения magenta-красителем в «синей» части спектра, при разных способах маскирования.

m_B/m — отношение оптической плотности magenta-красителя за синим фильтром к его же оптической плотности за зеленым фильтром;

γ_m — гамма красочного репродукционного magenta-изображения;

γ_y — гамма красочного репродукционного yellow-изображения относительно гамма «синей» негативной сепарации;

γ_t — гамма оригинального изображения за зеленым фильтром;

γ_B — гамма фотоматериала, предназначенного к изготовлению «синей» негативной сепарации;

γ_G — гамма фотоматериала, предназначенного к изготовлению «зеленой» негативной сепарации;

(+) — необходим обращаемый маскирующий материал (или негативно-позитивный этап);

(−) — необходим негативный маскирующий материал.

помощью маскирования (Yule, 1938 и 1940). Ученый пришел к выводу, что колориметрически точное фотографическое репродуцирование возможно только при условии воспроизведения копий *теми же красителями*, из которых состоит оригинал, и при наличии шести масок, обеспечивающих подчинение этих красителей неким правилам (см. ниже), а также при надлежащем управлении тональным и хроматическим балансами.

По теории Юла, правила, которым должны подчиняться репродукционные красители, касаются свойств этих красителей в контексте изготовления негативных сепараций (или работы сканеров). При использовании денситометра, имитирующего спектральные чувствительности трех связок «негативная пленка — фильтр», правила Юла можно сформулировать в логике копировальных оптических плотностей, измеренных этим денситометром.

Итак, правила Юла, именуемые «*Правилом аддитивности*» и «*Правилом пропорциональности*», звучат так:[1]

[1] Приведенные определения полезно сравнить с правилами аддитивности и пропорциональности, описанными в разделе 14.19.

- *Правило аддитивности*. Копировальная оптическая плотность любой смеси трех красителей, измеренная за красным фильтром, должна быть равна сумме трех копировальных оптических плотностей каждого из красителей, измеренных за этим же фильтром. То же касается «зеленой» и «синей» копировальных оптических плотностей.
- *Правило пропорциональности*. В контексте копировальных оптических плотностей отношение полезного поглощения каждого из красителей к его паразитному поглощению не должно зависеть от концентраций этих красителей.

В слайдах этим правилам подчиняются все красители при условии, что красный, зеленый и синий фильтры, используемые при изготовлении негативных сепараций, пропускают только монохроматический свет. Такие фильтры совершенно непрактичны, поскольку их коэффициент пропускания очень низок, однако при использовании специальных узкополосных фильтров мы не сильно отклонимся от правил Юла. При изготовлении копий на отражающих носителях отклонение будет бóльшим, однако нелинейность тоновоспроизведения может помочь уменьшить степень этого отклонения.

В случае полного выполнения всех условий Юла мы можем получить колориметрически точную копию оригинального изображения сцены, если копия эта, напомним, будет воспроизведена теми же красителями, из которых состоит оригинал.

15.7.1 Маскирование при одинаковых красочных составах оригинального изображения и его репродукции

Коль скоро качественный состав красителей оригинала и репродукции одинаков, колориметрически точным цветовоспроизведение будет тогда, когда копировальные оптические плотности элементов оригинала (O_r, O_g, O_b) будут равны копировальным оптическим плотностям соответствующих элементов репродукции (R_r, R_g, R_b), то есть:

$$R_r = O_r$$
$$R_g = O_g$$
$$R_b = O_b$$

Правило аддитивности позволяет нам записать вышеприведенную систему уравнений как:

$$C_r + M_r + Y_r = O_r$$
$$C_g + M_g + Y_g = O_g$$
$$C_b + M_b + Y_b = O_b$$

где копировальные оптические плотности представлены в виде суммы вкладов каждого красителя в эти плотности: C_r — означает вклад cyan-красителя в копировальную оптическую плотность за красным фильтром, M_r — magenta-красителя и т.д.

Если и эту систему уравнений мы перепишем как:

$$C_r + k_3 M_g + k_5 Y_b = O_r$$
$$k_1 C_r + M_g + k_6 Y_b = O_g$$
$$k_2 C_r + k_4 M_g + Y_b = O_b$$

где $k_1 = C_g/C_r$, $k_3 = M_g/M_r$ и т.д., то на основании правила пропорциональности мы увидим, что k-значения не зависят от концентрации красителей, то есть — константны. Следовательно, мы можем решить приведенную систему уравнений в общем виде относительно переменных C_r, M_g и Y_b:

$$C_r = \gamma_1 O_r + \gamma_2 O_g + \gamma_3 O_b$$
$$M_g = \gamma_4 O_r + \gamma_5 O_g + \gamma_6 O_b$$
$$Y_b = \gamma_7 O_r + \gamma_8 O_g + \gamma_9 O_b$$

где $\gamma_1 \ldots \gamma_9$ — это коэффициенты контрастности фотоматериалов, участвующих в цветорепродукционном процессе.

Поясним.

Если негативная сепарация, экспонированная за красным фильтром и имеющая результирующую гамма γ_1, объединена с маской, полученной с оригинала за зеленым фильтром и имеющей результирующий коэффициент контрастности γ_2, а также с маской, полученной с оригинала за синим фильтром и имеющей результирующий коэффициент контрастности γ_3, то выход cyan-красителя в каждой точке репродукции будет адекватным задаче колориметрического цветовоспроизведения (если, конечно, не предполагается никаких тоновых коррекций cyan-красочного изображения).

Важно отметить, что, когда маски выполняются непосредственно с оригинального слайда, они должны экспонироваться этим слайдом в связке с такими фильтрами, что уравнивают спектральные чувствительности маскирующих материалов со спектральными чувствительностями негативного фотоматериала, использованного для изготовления сепараций.

Аналогично γ_5 и γ_9 — это коэффициенты контрастности оставшихся двух негативных сепараций, а γ_4, γ_6, γ_7 и γ_8 — коэффициенты контрастности масок, обеспечивающие адекватный выход magenta- и yellow-красителей в каждой точке репродукции.

Следовательно, если на всех этапах фотографического цветорепродукционного процесса не предполагается какой-либо тоновой коррекции, то использование сепарированных негативов и соответствующих масок гарантирует получение колориметрически точной копии оригинального изображения сцены.

Сказанное, напомним, справедливо при условии, что качественные составы красителей оригинала и репродукции одинаковы. Но как быть, если оригинальное изображение и его будущая репродукция имеют заведомо разный состав красителей?

15.7.2 Маскирование при разных составах красителей оригинального изображения и его репродукции

Юл утверждает, что при подчинении репродукционных красителей правилам аддитивности и пропорциональности, а также при наличии шести необходимых масок, колориметрическое цветовоспроизведение по-прежнему возможно (разумеется, в рамках охвата репродукционных красителей). При этом фильтры, через которые экспонировались негативные сепарации, должны приводить спектральные чувствительности негативных фотоматериалов к трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя какого-либо набора (см. разделы 7.4, 8.3, а относительно сканеров — 29.18 и 32.6). При денситометрии красителей спектральные чувствительности прибора долж-

ны быть эквивалентны выбранному набору трихроматических кривых Стандартного наблюдателя.

Теперь предположим, что спектральные чувствительности негативных сепараций перед их экспонированием были каким-то образом (например, с помощью специальных фильтров) уравнены с CIE-кривыми Стандартного наблюдателя $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. В этом случае каждый точечный элемент оригинала с трехстимульными значениями X, Y и Z будет зафиксирован на сепарациях в виде строго пропорциональных этим значениям соответствующих экспозиций (E_x, E_y и E_z). Если $O_x = -\lg E_x$, $O_y = -\lg E_y$ и $O_z = -\lg E_z$, мы можем рассматривать их как оптические плотности элементов оригинала по $\bar{x}(\lambda)$-, $\bar{y}(\lambda)$- и $\bar{z}(\lambda)$-кривым.

Аналогично если оптические плотности репродукции, измеренные по данным кривым, обозначить как R_x, R_y и R_z, то условие колориметрической точности цветовоспроизведения упрощается до:

$$R_x = O_x$$
$$R_y = O_y$$
$$R_z = O_z$$

из чего следует, что трехстимульные значения элементов репродукции будут равны трехстимульным значениям соответствующих элементов оригинального изображения, и, следовательно, оригинал и репродукция окажут на «зрительную систему» Стандартного колориметрического наблюдателя CIE одинаковое воздействие.

Правило аддитивности позволяет нам переписать вышеприведенные уравнения следующим образом:

$$C_x + M_x + Y_x = O_x$$
$$C_y + M_y + Y_y = O_y$$
$$C_z + M_z + Y_z = O_z$$

где копировальные оптические плотности по каждой из трех кривых представлены в виде суммы вкладов каждого красителя в эти плотности: C_x — означает вклад cyan-красителя в копировальную оптическую плотность по кривой $\bar{x}(\lambda)$, M_x — magenta-красителя по кривой $\bar{x}(\lambda)$ и т.д. Если же и эту систему уравнений мы перепишем как:

$$C_x + k'_3 M_y + k'_5 Y_z = O_x$$
$$k'_1 C_x + M_y + k'_6 Y_z = O_y$$
$$k'_2 C_x + k'_4 M_y + Y_z = O_z$$

где $k'_1 = C_y / C_x$, $k'_2 = C_z / C_x$ и т.д., то на основании правила пропорциональности мы увидим, что k'-значения не зависят от концентрации красителей, то есть — константны. Следовательно, мы можем решить приведенную систему уравнений относительно переменных C_x, M_y и Y_z:

$$C_x = \gamma'_1 O_x + \gamma'_2 O_y + \gamma'_3 O_z$$
$$M_y = \gamma'_4 O_x + \gamma'_5 O_y + \gamma'_6 O_z$$
$$Y_z = \gamma'_7 O_x + \gamma'_8 O_y + \gamma'_9 O_z$$

где γ-коэффициенты — это коэффициенты контрастности фотоматериалов, участвующих в цветорепродукционном процессе. Расчетные значения C_x, M_y и Y_z указывают на то, какими должны быть концентрации голубого, пурпурного и желтого красителей в каждой точке репродукции, дабы обеспечить ее колориметрическое соответствие оригинальному изображению. Диагональные коэффициенты γ'_1, γ'_5 и γ'_9 — это коэффициенты контрастности негативных сепараций, а оставшиеся коэффициенты — это коэффициенты контрастности шести масок, использованных в связке с сепарациями при печати результирующих красочных изображений, образующих репродукцию.

Ранее для удобства изложения мы допустили, что кривые спектральных чувствительностей подсистем «белый свет/фильтр/негативный черно-белый фотоматериал» идентичны трихроматическим кривым $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Однако строгое выполнение этого условия необязательно: на самом деле могут использоваться любые линейные комбинации трихроматических кривых Стандартного наблюдателя, и единственное, чего можно ожидать, — это того, что уравнения расчета коэффициентов контрастности масок и сепараций будут давать разные комплекты значений.

Сказанное касается и оптических плотностей: использование любого набора трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (даже когда он окажется отличным от того, что использовался при изготовлении негативных сепараций) не может повредить делу и дискредитировать самою идею (и лишь решения уравнений расчета коэффициентов контрастности масок и сепараций будут давать разные комплекты значений).

Когда оптические плотности красителей измеряются прибором, спектральные чувствительности которого эквивалентны трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя, строгого подчинения процесса правилам аддитивности и пропорциональности нет: трихроматические кривые много шире, чем кривые пропускания узкополосных зональных фильтров (последние в целом отвечают этим правилам), из-за чего отклонение от требований Юла весьма велико. Данное ограничение снижает практичность описанного подхода, однако нелинейность характеристических кривых может помочь несколько компенсировать это отклонение (Gutteridge, 1972); маскирование при этом с успехом может опереться на принцип метамерного равенства стимулов, управляемых красителями репродукции, стимулам, воспроизводимым элементами оригинала (Clapper, Breneman и Brownstein, 1977).

15.8 МАСКИРОВАНИЕ ПРИ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИИ НЕВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Вопросы приблизительного колориметрического цветовоспроизведения в ситуациях, когда оригинал состоит из произвольного набора красителей, активно исследовались Марриажем, Миллером, Бревером, Хэнсоном и др. (MacAdam, 1938; Marriage, 1940).

Марриаж говорит о том, что маскирование может применяться либо с целью коррекции спектральных чувствительностей оригинального фотоматериала, либо же с целью компенсации паразитных поглощений красителями (или красками), либо же и того и другого. Ученый полагает компенсацию паразитных поглощений главной функцией масок и развивает теорию Юла именно в этом направлении (Marriage, 1940).

Миллер, в свою очередь, утверждает то же (Miller, 1941) и с большим успехом применяет матричную алгебру при вычислении коэффициентов контрастности маскирующих материалов.

Марриаж также говорит о том, что с помощью маскирования можно гарантировать колориметрически точную передачу как минимум четырех стимулов (Marriage, 1948): травяно-зеленого, цвета кожи, белого и серого. Последние два, в свою очередь, гарантируют более или менее корректную передачу всех градаций серого (от черного до белого). Описанный подход был развит другими исследователями (Brewer, Hanson и Horton, 1949), в частности, его применили к тем случаям, в которых вместо попыток колориметрически точного воспроизведения четырех стимулов, маски подбирались так, что погрешности по большому числу неких (специально подобранных) объектов сводились к минимуму.

По критерию минимума погрешностей Бревер и Хэнсон исследовали относительную значимость паразитных поглощений красителями, а также значимость отсутствия отрицательных участков в кривых спектральной чувствительности фотоматериалов (Brewer и Hanson, 1954). Ученые пришли к выводу, что паразитные поглощения красителями ведут к бóльшим погрешностям цветовоспроизведения, нежели отсутствие отрицательных участков в кривых спектральной чувствительности, однако последнее тоже вносит определенный вклад в эти погрешности.

О том, что путем правильного подбора масок, коэффициентов контрастности и хроматического баланса можно обеспечить безошибочное воспроизведение любых четырех стимулов, свидетельствуют уже приводимые нами уравнения, в которых используются три дополнительных коэффициента:

$$C_x = \gamma_1 O_x + \gamma_2 O_y + \gamma_3 O_z + \gamma_{10}$$
$$M_y = \gamma_4 O_x + \gamma_5 O_y + \gamma_6 O_z + \gamma_{11}$$
$$Y_z = \gamma_7 O_x + \gamma_8 O_y + \gamma_9 O_z + \gamma_{12}$$

где γ_{10}, γ_{11} и γ_{12} — переменные хроматического баланса. Понятно, что при колориметрическом цветовоспроизведении эти коэффициенты равны нулю по всем стимулам, но если цветовоспроизведение отклоняется от колориметрического (что чаще всего и бывает на практике) — эти коэффициенты могут использоваться с целью минимизации погрешностей.

Таким образом, для точного воспроизведения неких четырех выбранных стимулов три уравнения по каждому стимулу дадут в сумме 12 уравнений, решив которые можно найти $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_{12}$. Полученные значения дадут значения коэффициентов контрастности красочных изображений, масок и коэффициентов хроматического баланса, необходимых для высокоточного воспроизведения четырех цветовых стимулов заданных цветов.

С помощью аналогичных уравнений Бревер и Хэнсон рассчитали величины двенадцати коэффициентов для сепараций, масок и хроматических балансов по разным условиям просмотра (Brewer и Hanson, 1955). При этом в выборе спектральных чувствительностей цветорепродукционных подсистем исследователи не ограничились линейными комбинациями трихроматических кривых $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, но также использовали проверенные и хорошо зарекомендовавшие себя наборы кривых без отрицательных участков и плюс к тому кривые, что чаще всего применяются на практике.

Было исследовано 60 цветовых стимулов, разделенных на три группы по 20 стимулов в каждой. В первую группу были отобраны цветовые стимулы, выходящие за пределы колориметрического охвата используемых репродукционных красителей; во

вторую и третью были помещены стимулы меньшей колориметрической чистоты, но при этом как можно более типичные большинству изображений.

Исследование дало серию любопытных данных.

Во-первых, выяснилось, что коль скоро величины коэффициентов ничем не ограничены, то есть, коль скоро все шесть масок могут иметь любые коэффициенты контрастности, то выбор между возможными наборами кривых чувствительности оказался весьма невелик.

Во-вторых, было обнаружено, что чем больше кривые спектральной чувствительности перекрывают друг друга, как, скажем, в случае кривых $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, тем выше необходимые коэффициенты контрастности масок, и наоборот: коэффициенты контрастности масок тем ниже, чем более спектрально селективны кривые чувствительности подсистем.

В-третьих, стало понятно, что отсутствие отрицательных участков в кривых спектральной чувствительности хоть и ведет к некоторому повышению коэффициентов контрастности масок, но при этом менее значимо, чем корректность разделения кривых по длинам волн.

В-четвертых, оказалось, что специфика выбора тестовых стимулов влияет на величины коэффициентов — колориметрически точное воспроизведение стимулов большей колориметрической чистоты потребовало несколько бóльших значений гамма (хотя нельзя сказать что существенно бóльших).

В-пятых, выяснилось, что финальные величины репродукционных погрешностей весьма малы: по типичным стимулам средняя погрешность по двухградусному полю зрения оказалась равной всего лишь тройному JND (just noticeable difference — едва заметное отличие); по стимулам с высокой колориметрической чистотой средняя погрешность была примерно в четыре раза выше.

Практическая ценность описанных исследований может показаться невысокой, поскольку использование шести масок затруднительно (не считая сканеров), фотографические процессы чаще всего нелинейны, а красители чаще всего не соответствуют юловским требованиям пропорциональности и аддитивности.

Однако в негативно-позитивных процессах оптически активные краскообразующие компоненты дают реальную возможность интеграции в слои фотопленок нескольких масок (к примеру, во многих фотоматериалах используется три маски).

Отметим, что для получения ощутимого практического эффекта одной низкоконтрастной маски (из шести возможных) недостаточно, поэтому необходима добавка минимум двух масок, организованных либо окрашенными куплерами, либо функционально замещенных межслойными эффектами.

В контексте минимизации погрешностей при колориметрическом цветовоспроизведении подчинение правилам аддитивности и пропорциональности необязательно, однако, если маскирование выполняется за счет оптически активных краскообразующих компонент, желательно, чтобы красители, прокрашивающие эти компоненты, подчинялись оговоренным правилам. Впрочем, в рамках рабочего диапазона оптических плотностей большинства фотоматериалов так и происходит.

Таким образом, мы видим, что цветной негативный фотоматериал может иметь встроенные маски и систему обеспечения межслойных эффектов, позволяющие выполнять отпечатки с весьма малыми колориметрическими погрешностями по заурядным цветовым стимулам.

Однако, отклонение системы от критерия Лютера — Айвса, т.е. ее спектральных чувствительностей от линейной комбинации трихроматических кривых Стандартно-

го наблюдателя, ведет к тому, что цветорепродукционная система становится беспомощной в отношении специфических цветовых стимулов. Любопытно отметить, что высокая спектральная селективность кривых чувствительности, снижающая контрастность масок, одновременно ведет к серьезным погрешностям воспроизведения стимулов, если угодно — «проблемных» спектральных распределений (см. разделы 5.1 и 9.5), в частности однозначно-синих стимулов. С практической точки зрения, однако, низкоконтрастные маски все же весьма желательны, поскольку цветорепродукционные системы, задействующие оптически активные краскообразующие компоненты, во-первых, не должны быть излишне «капризны» в управлении, во-вторых, не должны быть чересчур «светоемки».

В заключение раздела отметим, что цветорепродукционные задачи, требующие низкоконтрастного маскирования, лучше решать с помощью тех систем, которые могут обойтись вообще без масок, поскольку отклонения, возникающие при отсутствии низкоконтрастных масок, ощутимо меньше тех погрешностей, что возникают при отсутствии масок высококонтрастных.

15.9 ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНТРАСТНОСТИ МАСОК

Вычисление коэффициента контрастности масок удобнее всего проводить с помощью приемов матричной алгебры (см. Приложение 1) (Miller, 1941). Если оптические плотности по полезным и паразитным поглощениям репродукционных красителей при нейтральной оптической плотности 1.0 — это:

	Cyan	*Magenta*	*Yellow*
Оптическая плотность по «красной» зоне	c	m_R	y_R
Оптическая плотность по «зеленой» зоне	c_G	m	y_G
Оптическая плотность по «синей» зоне	c_B	m_B	y

то, при условии, что общий коэффициент контрастности репродукции предполагается таким же как и у оригинала, коэффициенты контрастности маскирующих фотоматериалов и негативных фотоматериалов для сепараций вычисляются по уравнению:

$$\begin{pmatrix} \gamma_R & \gamma_{GR} & \gamma_{BR} \\ \gamma_{RG} & \gamma_G & \gamma_{BG} \\ \gamma_{RB} & \gamma_{GB} & \gamma_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c & m_R & y_R \\ c_G & m & y_G \\ c_B & m_B & y \end{pmatrix}^{-1}$$

где γ_R, γ_G и γ_B — коэффициенты контрастности негативных сепараций, γ_{GR} и γ_{BR} — коэффициенты контрастности масок, выполненных соответственно через зеленый и синий фильтры и используемых с «красной» негативной сепарацией для управления выходом cyan-красителя (т.е. формирования cyan-красочного репродукционного изображения).

Если маски накладываются не на негативные сепарации, а на оригинальное изображение, то их коэффициенты контрастности должны быть разделены на величину

гамма сепарации, выполняемой за красным фильтром (γ_R), а сами маски должны быть не позитивными, а негативными.

Аналогично γ_{RG} и γ_{BG} — это коэффициенты контрастности масок, накладываемых на сепарацию, управляющую выходом magenta-красителя, γ_{RB} и γ_{GB} — коэффициенты контрастности масок, накладываемых на сепарацию, управляющую выходом yellow-красителя (то есть формированием желтого красочного репродукционного изображения).

Очень часто одна у двух из шести масок коэффициент контрастности оказывается настолько низким, что маски эти можно удалить из процесса без особого риска потери качества результирующей копии. К примеру, в цветной фотографии мы часто наблюдаем следующую картину:

	Cyan	*Magenta*	*Yellow*
Оптическая плотность по «красной» зоне	0.94	0.05	0.01
Оптическая плотность по «зеленой» зоне	0.10	0.82	0.08
Оптическая плотность по «синей» зоне	0.10	0.25	0.65

Коэффициенты контрастности негативных сепараций и масок будут соответственно равны:

$$\begin{pmatrix} \gamma_R & \gamma_{GR} & \gamma_{BR} \\ \gamma_{RG} & \gamma_G & \gamma_{BG} \\ \gamma_{RB} & \gamma_{GB} & \gamma_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.94 & 0.05 & 0.01 \\ 0.10 & 0.82 & 0.08 \\ 0.10 & 0.25 & 0.65 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 1.07 & -0.06 & -0.01 \\ -0.12 & 1.27 & -0.15 \\ -0.12 & -0.48 & 1.60 \end{pmatrix}$$

где положительные значения коэффициентов соответствуют негативным маскам, а отрицательные — позитивным. Мы видим, что значения коэффициентов контрастности двух масок, которые должны накладываться на негативную cyan-сепарацию, очень малы (0.06 и 0.01), и ими можно пренебречь. Последнее позволительно потому, что паразитное поглощение по «красной» зоне спектра magenta- и yellow-красителями крайне невелико. Мы видим также, что наиболее контрастной является маска, изготовленная за зеленым фильтром (γ_{GB} = 0.48), т.е. маска которая должна накладываться на «синюю» негативную сепарацию. Высокая гамма этой маски есть следствие сильного паразитного поглощения в «синей» части спектра magenta-красителем.

Отметим, что когда в роли оригинала выступает цветной слайд, то маскирование в первую очередь компенсирует паразитные поглощения красителями слайда, нежели репродукционными красителями. В данном случае оптические плотности, участвующие в вычислениях, должны быть оптическими плотностями красителей *слайда*. Более того, при вычислениях данного типа не составляет труда компенсировать эффект паразитных поглощений как в оригинале, так и в репродукции, и, следовательно, повысить качество оригинала как минимум по данному критерию.

Некоторые сугубо практические приемы маскирования обсуждаются нами в гл. 28 (см. также рис. 26.7 как пример маскирования).

И последнее: всегда должно помнить, что маскирование эффективно только тогда, когда наличествует краситель, количество которого можно уменьшить; если такового нет — компенсация невозможна и колориметрический охват репродукции будет ограничен колориметрическим охватом репродукционных красителей.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Barr, C.R., Thirtle, J.R., and Vittum, P.W., Phot. Sci. Eng., 13, 74 and 214 (1969).
Brewer, W.L., and Hanson, W.T., J. Opt. Soc. Amer., 44, 129 (1954).
Brewer, W.L., and Hanson, W.T., J. Opt. Soc. Amer., 45, 476 (1955).
Brewer, W.L., Hanson, W.T., and Horton, C.A., J. Opt. Soc. Amer., 39, 924 (1949).
Clapper, F.R., Breneman, E.J., and Brownstein, S.A., J. Phot. Sci., 25, 64 (1977).
Evans, R.M., Penrose Annual, 45, 81 (1951).
Evans, R.M., P.S.A. Journal, p. 15 (February, 1954).
Gutteridge, C., Phot. Sci. Eng., 16, 214 (1972).
Hanson, W.T., J. Opt. Soc. Amer., 40, 166 (1950).
Hanson, W.T., and Horton, C.A., J. Opt. Soc. Amer., 42, 663 (1952).
MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer., 28, 466 (1938).
Marriage, A., Phot. J., 80, 364 (1940).
Marriage, A., Phot. J., 88B, 75 (1948).
Meissner, H.D., Phot. Sci. Eng., 13, 141 (1969).
Miller, C.W., J. Opt. Soc. Amer., 31, 477 (1941).
Neblette, C.B., Photography, Its Materials and Processes, 6th Edn., p. 463, Von Nostrand, New York (1962).
Sant, A.J., Phot. Sci. Eng., 5, 181 (1961).
Tull, A.G., Brit. J. Photog., 122, 955 (1975).
Watson, R.N., J. Phot. Sci., 14, 304 (1966).
Yule, J.A.C., J. Opt. Soc. Amer., 28, 419 and 481 (1938).
Yule, J.A.C., Phot. J., 80, 408 (1940).
Yule, J.A.C., Phot. J., 84, 321 (1944).

16 ПЕЧАТЬ ЦВЕТНЫХ НЕГАТИВОВ

16.1 ВВЕДЕНИЕ

Как промежуточная инстанция в печати полноцветных фотографий цветные негативы получили широчайшее распространение. Однако, чтобы на выходе получать позитивные изображения требуемого качества, в процессе печати нужно умело управлять экспозицией фотобумаги (или копировальной пленки), поскольку тональный и хроматический балансы отпечатков определяются множеством факторов.

Вместе с тем необычайно трудно, практически невозможно, правильно подобрать экспозиционные параметры, лишь взглянув на негатив. Поэтому с целью решения проблемы управления экспозиционными параметрами печати были разработаны различные технологические приемы, характер которых зависим от специфики той или иной негативно-позитивной системы.

16.2 ПЕЧАТЬ СТУДИЙНЫХ НЕГАТИВОВ

Профессиональная студийная съемка дает самые устойчивые и предсказуемые результаты: освещение полностью контролируется как по цветности, так и по интенсивности; в течение фотосессии обычно используется пленка одной партии; обработка фотоматериалов ведется обычно по одной и той же схеме. В этих условиях, параметры печати устанавливаются по наиболее типичному негативу, а все последующие печатаются при тех же уровнях экспозиции и цветности экспонирующего света. Результаты печати при этом оказываются близкими к оптимуму и по тональному, и по хроматическому балансам.

Высокая продажная стоимость студийных снимков позволяет фотографу выполнять пробные оттиски, то есть добиваться требуемых результатов со второй и даже порой с третьей попытки (при этом направление необходимой коррекции тонального и хроматического балансов хорошо видно на глаз). Вместе с тем, коль скоро учесть все факторы, влияющие на конечный результат невозможно, при печати *первой* пробы следует соблюдать ряд правил, позволяющих подойти к оптимуму максимально близко.

16.2.3 Серая карта

Одним из наиболее распространенных методов, позволяющих с первой попытки выполнять отпечатки, близкие к оптимальным, является установка в кадре т.н. *серой карты* с целью последующего измерения зональных копировальных оптических плотностей ее изображения на негативе; правильные экспозиционные параметры рассчитываются затем из этих плотностей.

При съемке в крупный формат серую карту (снятую в размер, подходящий для последующего измерения) обычно располагают в стороне от сюжетно значимой области изображения; в узкоформатных снимках карта нужного размера обычно занимает

слишком много места, поэтому данный метод, как правило, используется лишь при серийной съемке сходных сцен, а серая карта экспонируется на отдельный кадр.

16.2.4 Объект памятного цвета

Если по каким-то причинам использование серой карты невозможно, то для измерений выбирают изображение объекта с каким-либо памятным цветом, например цветом кожи (см. раздел 16.11), а экспозиционные параметры подгоняют под корректное (или желаемое) воспроизведение отпечатком соответствующего цветового стимула.

16.2.5 Электронная визуализация

Сегодня для предварительного просмотра негативов широко используют т.н. *DTP-системы* (сканер — компьютер — монитор), однако следует помнить, что восприятие изображения, визуализированного монитором, обычно иное, нежели восприятие этого же изображения, выполненного на отражающем носителе (Thomas, Waz и Dreyfoos, 1970; West, 1971; British Journal of Photography, 1972). Следовательно, для определения требуемых параметров печати необходимы соответствующие поправки (либо использование CMS. — *Прим. пер.*).

16.2.6 Хроматический и тональный балансы

Управление хроматическим балансом отпечатков обычно выполняется за счет голубого, пурпурного и желтого фильтров, устанавливаемых на пути белого светового потока лампы фотоувеличителя. Тональным балансом изображения манипулируют либо за счет экспозиционной выдержки, либо диафрагмы объектива, либо за счет того и другого одновременно.

Методы цифровой печати мы рассмотрим в гл. 33.

16.3 ПЕЧАТЬ КИНОНЕГАТИВОВ

Сложности, возникающие при печати профессиональных кинонегативов сходны с теми, что описаны в предыдущем разделе и обычно относятся к управлению светом, оптикой, обработкой, а также к контролю стабильности параметров материалов в рамках партии. Широко используется денситометрия изображений серых карт и других стандартных цветовых образцов, а также электронный контроль процессов.

Дополнительной сложностью может явиться необходимость управления экспозиционным светом в отдельных кадрах, что диктуется художественными требованиями (например, создание определенного настроения с помощью нестандартных тонального и хроматического балансов изображения). То есть, множество разных сцен, зафиксированных на негативной кинопленке, должны в скоростном режиме копироваться на позитив, и, следовательно, необходима быстрая смена параметров этого копирования.

Самоя печать в кинематографе выполняется либо контактным способом, либо проекционным (последнее на профессиональном языке кинематографистов звучит как «*оптическая печать*»). Проекционная печать должна использоваться, разумеется, тогда, когда существует необходимость в изменении размера или формы изображения, однако контактная печать проще, менее зависима от грязи и царапин на оригинале и, как правило, дает бо́льшую резкость копии.

16.3.1 Кинопринтеры

По способу протяжки пленки кинопринтеры делятся на две основных группы: принтеры *непрерывной протяжки* и принтеры *протяжки покадровой* (т.н. *шаговая печать*); по способу управления экспозиционными параметрами — на *таймерные* и *аддитивные*.

Таймерные принтеры управляют параметрами печати за счет голубого, пурпурного, желтого, а также нейтрального фильтров, установленных на пути экспонирующего белого светового потока.

В аддитивных принтерах экспонирование осуществляется раздельными красным, зеленым и синим лучами, которые смешиваются в т.н. *печатном окне*; управление тональным и хроматическим балансами копии реализуется за счет манипуляции относительными (или абсолютными) фотометрическими яркостями этих лучей. Несмотря на то что последнее ведет к усложнению конструкции кинокопировального аппарата, преимущество аддитивных кинопринтеров заключено в возможности управления экспозицией каждого из слоев копировального материала независимо от экспозиции двух других слоев (в то время как голубой, пурпурный и желтый фильтры имеют определенные паразитные поглощения, в результате которых один фильтр оказывает влияние не только на «свой», но и на «чужие» слои фотоматериала).

Отметим также, что в конструкции аддитивных принтеров задействованы т.н. *дихроичные зеркала*, разделяющие белый свет на красный, зеленый и синий потоки, а затем вновь собирающие их.

В современных кинокопировальных аппаратах параметрами печати управляет компьютер.

16.4 ПЕЧАТЬ ЛЮБИТЕЛЬСКИХ НЕГАТИВОВ

Освещение сцен, зафиксированных фотолюбителями, совершенно непредсказуемо и может оказаться каким угодно (равно как непредсказуемы и иные факторы выполненной съемки). В результате в управлении экспозиционными параметрами печати любительских негативов существует еще бóльшая необходимость, чем при печати негативов профессиональных или негативов кинематографических; при этом стоимость любительских отпечатков должна оставаться приемлемо низкой. Короче говоря, любительскому сектору фотографического рынка крайне необходима методика простого и быстрого управления экспозиционными параметрами печати, не требующая высокой квалификации персонала и дающая с первого раза эффектные и, главное, продаваемые отпечатки. Соответствие перечисленным требованиям было и остается предметом огромных технологических усилий. Некоторые наиболее удачные решения мы опишем в следующих разделах.

16.5 КОРРЕКТИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

При печати цветных негативов на тональный и хроматический балансы изображения могут повлиять следующие факторы:

1. Интенсивность освещения сцены.
2. Цветность освещения сцены.
3. Контекст сцены.
4. Спектральный коэффициент пропускания объектива фотоаппарата.
5. Диафрагма, выдержка и чувствительность пленки.

6. Экспозиционный хроматический баланс пленки.
7. Сохраняемость скрытого изображения на фотопленке.
8. Режим обработки фотопленки.
9. Технические характеристики принтера.
10. Чувствительность фотобумаги и ее экспозиционный хроматический баланс.
11. Сохраняемость скрытого изображения на фотобумаге.
12. Режим обработки фотобумаги.
13. Цветность, геометрия и интенсивность экспонирующего света (при печати).

Общее влияние факторов с 1 по 8 на тональный и хроматический балансы любительского негатива показано на рис. 16.1: мы видим, что потенциальный разброс результатов печати может оказаться очень велик (если не приняты специальные меры).

16.6 ПЕРВЫЕ ФОТОПРИНТЕРЫ

Первый фотопринтер («Eastman Kodak 1598 Printer»), способный корректировать экспозиционные недочеты съемки, отклонения по хроматическому балансу и издержки химической обработки негатива (позиции 1, 5, 6 и 8 раздела 16.5), появился в начале 40-х годов XX века.

Перед обработкой каждой отснятой пленки на ее неэкспонированный концевой участок строго равномерным светом впечатывался маленький патч. После обработки измерялись зональные оптические плотности этого патча (за красным, зеленым и синим фильтрами), затем возле каждого кадра негативной пленки (вдоль одного из краев) пробивалось маленькое отверстие.

Размер и позиция отверстия несли информацию о требуемых цветности и оптической плотности корректирующих фильтров для приведения среднего коэффициента пропускания фотоматериала к стандартному значению. При печати соответствующие фильтры перекрывали экспонирующий световой поток, после чего специальный фотоэлемент, управляя позицией нейтрального клина в этом потоке, выставлял время экспозиции фотобумаги, необходимое для получения корректного тонального баланса отпечатка (исходя при этом из усредненной оптической плотности элементов кадра). Фотоэлемент, разумеется, не мог выявить сцены, недоэкспонированные по светам (как, скажем, залитые солнцем снежные поля) или переэкспонированные по теням (как, скажем, угольная куча), и в обоих случаях «старался» привести изображение к средне-серому. Следовательно, оператор был вынужден вводить контекстные экспозиционные поправки (или, как говорят, «*выполнял экспозиционную приладку*»), отталкиваясь от того, что «предложил» фотоэлемент.

Для своего времени описанный метод, бесспорно, явился весьма прогрессивным, однако хроматический баланс отпечатков все равно оставался достаточно вариабельным, и проблема отыскания принципа эффективного управления этим балансом не теряла своей актуальности.

16.7 БАЛАНС СЕРОГО (ПРИНЦИП ЭВАНСА)

Во множество принтеров, сконструированных позднее специально в расчете на печать с любительских цветных негативов, был заложен принцип, впервые сформулированный Ральфом Эвансом[1]: «Цветные отпечатки чаще всего смотрятся лучше не за

[1] Dr. Ralph M. Evans, Kodak Research Laboratories. — *Прим. пер.*

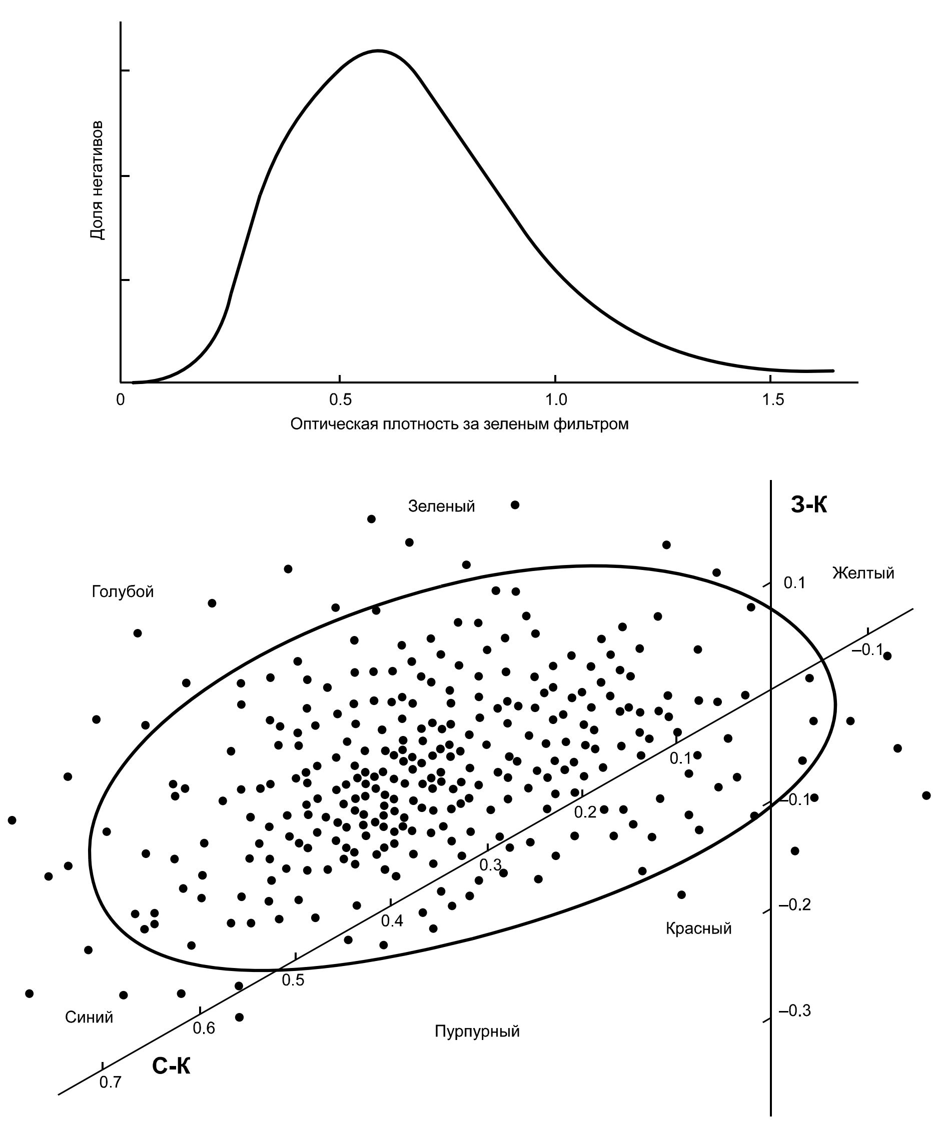


Рис. 16.1 Диапазон оптических плотностей и хроматических балансов типичного набора любительских цветных негативов.
(a) — распределение оптической плотности, измеренной за зеленым фильтром;
(b) — распределение хроматического баланса (см. раздел 14.25).
Названия цветовых тонов указывают направление, в котором от среднего положения должны быть изменены цветность экспонирующего света или интересующего объекта, дабы результат оказался максимально близким к среднему значению. Если коррекция на стадии печати не выполнена, отпечатки будут иметь сходный хроматический сдвиг. Сами негативы при этом имеют сдвиг в сторону т.н. *комплементарных* (дополнительных) *цветовых тонов*.

Эллипсовидный контур заключает в себе примерно 90% точек.

счет правильного хроматического баланса, но когда серый напечатан серым — сие есть управление, приводящее изображение в целом к серому» (Evans, 1946).

На первый взгляд, эвансовский подход к проблеме выглядит абсурдным, действительно: если, к примеру, применить его к портрету девушки, одетой в красное платье, то изображение приобретает выраженный сине-зеленый сдвиг. Эванс, однако, утверждал, что в *реальной сцене* красное платье в любом случае понижает чувствительность

зрения к красным стимулам, чем вызывает физиологическое сине-зеленое смещение; следовательно, легкий сине-зеленый сдвиг на отпечатке не окажет существенного влияния на качество изображения. Однако то, что описанный физиологический эффект всерьез проявляет себя при рассматривании *изображений*, выполненных на отражающих носителях, достаточно сомнительно, хотя Бартлесон показал в свое время, что адаптация наблюдателя все же в какой-то степени зависит от хроматического баланса таких изображений (Bartleson, 1958). Вместе с тем высокий адаптирующий эффект хроматического баланса проектированных слайд-изображений доказан как самим Эвансом (Evans, 1943), так и Пиннеем и Де-Маршем (Pinney и DeMarsh, 1963). И уж совсем не подлежит сомнению то, что на практике принцип «баланса по серому» стал важнейшим фактором бурного развития систем эффективного управления экспозиционными параметрами печати любительских фотоснимков.

Итак, простейший путь обеспечения «баланса по серому» при печати негативов — это измерение их среднего коэффициента пропускания за красным, зеленым и синим фильтрами с последующим экспонированием каждого из светочувствительных слоев фотобумаги с уровнем экспозиции обратно пропорциональным этим коэффициентам. Однако далеко не факт, что при этом баланс серого на отпечатках будет соблюден строго: дело в том, что результаты зонального измерения коэффициентов пропускания негатива зависят в основном от темных участков сцены, благодаря чему изображения больше балансируются по серому в тенях, нежели в светах (данный эффект несколько снижен [но не устранен полностью] фактом низкой контрастности негативов, коэффициент которой обычно держится в районе 0.65).

Рассматривая каждый негатив как ключевую инстанцию, определяющую экспозицию фотобумаги, мы добиваемся коррекции отпечатка не только по уровню экспозиции негатива, не только по его хроматическому балансу и характеру обработки (позиции 1, 5, 6 и 8 раздела 16.5), но также по цветности освещения сцены, контексту этой сцены, спектру пропускания объектива фотоаппарата и свойствам скрытого изображения на фотопленке (позиции 2,3, 4 и 7). Действительно, такой подход ведет к ощутимому улучшению хроматического баланса любительских отпечатков, но при этом, безусловно, возникают погрешности в воспроизведении стимулов высокой чистоты цвета, занимающих бо́льшую площадь кадра (в особенности темных стимулов, т.е. зарегистрированных негативом в виде светлых областей). При всем этом процент цветоискажений в любительских снимках, отпечатанных по Эвансу, на удивление мал, и, если эти искажения возникают, их можно выправить перепечатав фотографии, причем руководствуясь уже не принципом баланса по серому, но управляя хроматическим балансом изображения вручную (или автоматически) (см. раздел 16.12).

И последнее: успех метода балансировки изображений по серому вероятнее всего обязан тому, что теневые области реальных сцен сами по себе стремятся к серому. Сей факт подтвержден колориметрией ряда уличных сцен, проведенной в свое время в Великобритании Питтом и Сельвином (Pitt и Selwyn, 1938).

16.8 EASTMAN KODAK 1599 PRINTER

Первым принтером, в котором управление экспозиционными параметрами печати было основано на принципе баланса по серому, стал «Eastman Kodak 1599 Printer», схема устройства которого показана на рис. 16.2: свет от нескольких маленьких ламп переменной мощности проходил через рассеиватель и освещал негатив. Регулировка интенсивности горения ламп в первых моделях принтера осуществлялась за счет т.н.

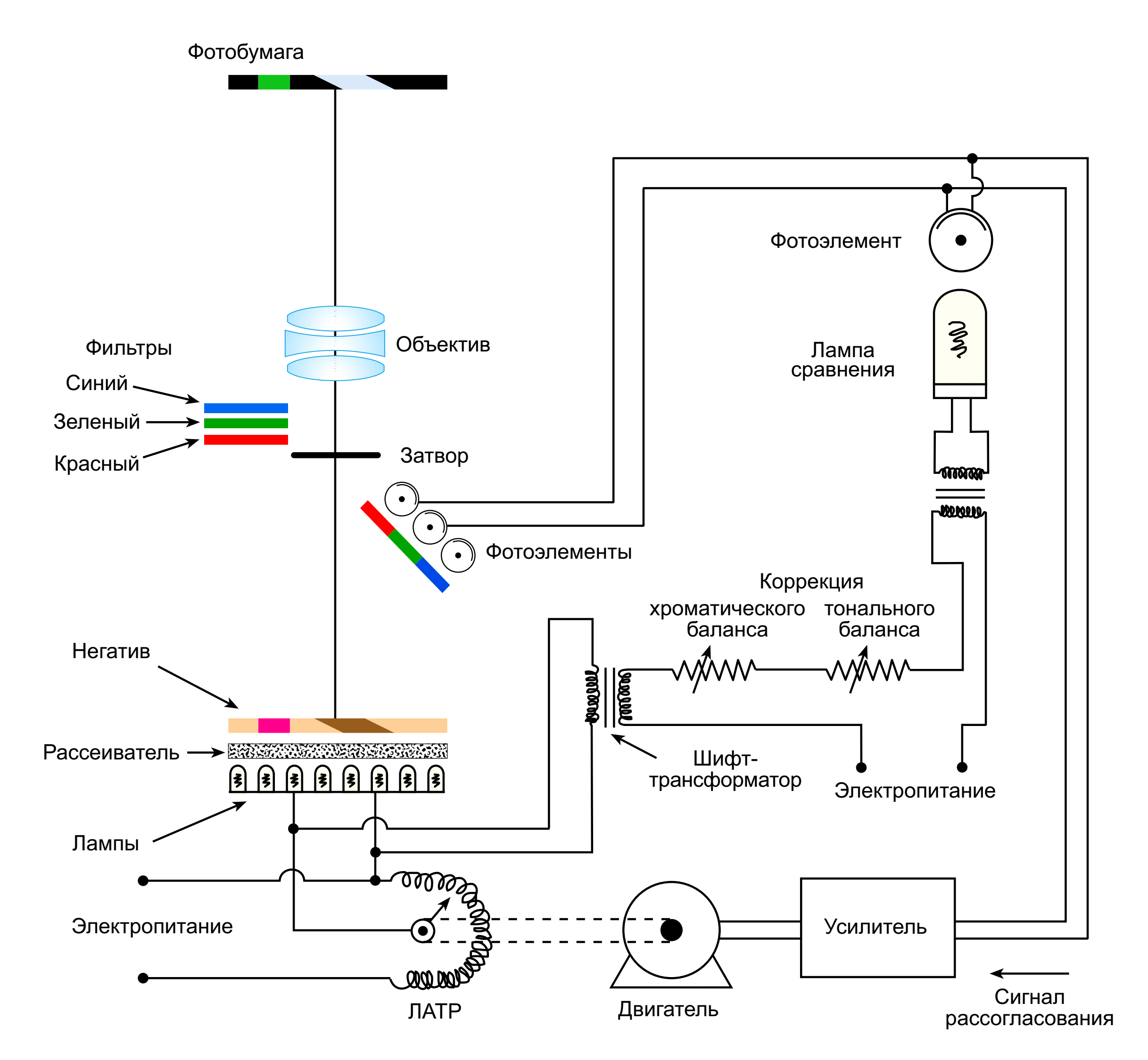


Рис. 16.2 Основные узлы принтера Eastman Kodak 1599.

ЛАТР (лабораторный автотрансформатор), в более поздних — при помощи магнитного усилителя. Рассеиватель, расположенный сразу над лампами, выполнял двойную функцию: нивелировал царапины и грязь на негативе (которые были бы весьма заметны в зеркальном свете), а также направлял часть света, прошедшего через негатив, на управляющие фотоэлементы.

Фотобумага экспонировалась последовательно за красным, зеленым и синим фильтрами, расположенными возле объектива принтера. Свет от негатива также падал на три фотогальванических элемента, расположенных за красным, зеленым и синим фильтрами; токи, возникающие в фотоэлементах, сверялись с током от фотоэлемента, освещенного лампой сравнения. Разница между двумя фототоками усиливалась и использовалась для автоматического управления напряжением на экспонирующих лампах (оно менялось до тех пор, пока фототоки не уравнивались). После чего выполнялась экспозиция фотобумаги за каждым фильтром в течение заданного времени.

Последовательность действий при печати была такова: оператор вставлял негатив в кадровое окно и давал команду «Пуск». Красный фильтр сдвигался в положение пе-

ред объективом, но при этом в течение 0.3 с оставался прикрытым шторкой затвора. За это время аппарат подбирал требуемую величину *интенсивности* экспозиции за красным фильтром. Затем затвор открывался на 0.5 с и вновь закрывался. Красный фильтр сдвигался в исходное положение, на его место перед объективом устанавливался зеленый фильтр, и операция повторялась: в течение 0.3 с подбиралась необходимая интенсивность «зеленой» экспозиции, затвор открывался на 0.5 с и вновь закрывался. По той же схеме подбиралась величина интенсивности экспозиции за синим фильтром.

Еще раз подчеркнем, что определение требуемой величины интенсивности горения лампы осуществлялось при закрытом затворе. Все поправки, необходимые для обеспечения должных тонального и хроматического балансов фотографии, выполнялись за счет потенциометров (на рис. обозначены как «Коррекция хроматического баланса» и «Коррекция тонального баланса»), управлявших напряжением, подаваемым на лампу сравнения. Частично это напряжение за счет т.н. «шифт-трансформатора» зависело от напряжения на экспонирующих лампах. Благодаря «шифт-трансформатору» окончательная интенсивность экспонирующего света за каждым фильтром определялась общей оптической плотностью негатива.

Отметим, что описанная методика, позволившая существенно поднять качество любительских фотоотпечатков, реализует принцип т.н. «*слоп-контроля*», который подробно описан в разделе 16.13 (Pieronek, Syverud и Voglesong, 1956; Hunt, 1960).

В заключение раздела стоит сказать, что принтер «Eastman Kodak 1599», появившийся в 1946 г., позволил резко увеличить долю снимков, удачно напечатанных *с первой попытки*, что явилось огромным шагом в развитии любительской цветной фотографии. Несмотря на то что экспозиционный цикл первых принтеров данной серии составлял порядка 4.5 с, высокая скорость печати достигалась за счет того, что по рулону фотобумаги фотографии шли в три ручья. При такой схеме хороший оператор мог выдавать до 1000 отпечатков в час. В более поздних версиях принтера экспозиционный цикл был сокращен до 2.25 с.

16.9 ПРИНТЕРЫ С ПЕРЕМЕННОЙ ЭКСПОЗИЦИОННОЙ ВЫДЕРЖКОЙ

Экспозиционный принцип «постоянная выдержка — переменная интенсивность экспонирующего света», использованный в принтере 1599, приводил к тому, что все негативы печатались с выдержкой, необходимой для максимально плотных негативов. Но когда при постоянной интенсивности освещения негатива меняется *время* экспозиции, то, даже при условии, что самым плотным негативам по-прежнему требуется максимальное время экспозиции, всем остальным понадобится меньшая его величина, и, следовательно, суммарное время экспозиции партии снимков можно ощутимо уменьшить.

Спустя почти 10 лет оба принципа («баланс по серому» и «переменная выдержка») были реализованы в принтере «Eastman Kodak IVC» (Pieronek, Syverud и Voglesong, 1956), в котором, однако по-прежнему требовались три последовательных экспозиции через красный, зеленый и синий фильтры, а выдержка регулировалась за счет того, что фотоэлемент заряжал некий конденсатор до определенного уровня напряжения.

16.10 ПЕРВЫЕ СУБТРАКТИВНЫЕ ПРИНТЕРЫ

Очевидно, что для обеспечения максимальной эффективности принтера необходима жесткая экономия как по выдержке, так и по расходу световой энергии. Сэкономить время можно не только за счет реализации принципа переменной выдержки, но также за счет одновременной (а не последовательной) экспозиции слоев фотобумаги. При этом традиционные красный, зеленый и синий фильтры в связке с различными светосмесителями неизбежно ведут к серьезным светопотерям и расходу электричества.

Радикально повысить экономичность принтеров удалось за счет перехода на *субтрактивный принцип печати*, при котором негатив в начале экспонировался белым светом, а затем, по достижении каждым из трех слоев фотобумаги минимально необходимой экспозиции, световой поток перекрывался соответствующим фильтром (см. ниже), предотвращая тем самым дальнейшее экспонирование того слоя, которому экспозиция более не требовалась. Экспонирование продолжалось до достижения полной экспозиции второго слоя после чего на пути экспонирующего светового потока устанавливался второй фильтр, и, наконец, то же происходило в отношении третьего слоя.

Отсечку экспозиции красночувствительного слоя фотобумаги осуществлял cyan-фильтр, зеленочувствительного — magenta-фильтр и синечувствительного, соответственно, yellow-фильтр.

Последовательность подстановки фильтров определялась контекстно, то есть данным конкретным негативом, в результате чего светопотери возникали только из-за паразитного поглощения cyan-, magenta- и yellow-фильтрами в период их нахождения в потоке экспонирующего света. Подстановка фильтров в световой поток происходила автоматически за счет соленоидов, приводимых в действие электричеством, накопленном в конденсаторах.

16.10.1 Принтер «Eastman Kodak S1»

Первый субтрактивный принтер «Eastman Kodak S1» (см. рис. 16.3), входивший в состав системы «Kodak processing station», был продемонстрирован в 1957 г. в Хемель Хемпстеде (Великобритания) и с 1958 г. поступил в массовую продажу (Richardson, 1958; Hunt, 1960). По рис. 16.3 мы видим, что голубой, пурпурный и желтый фильтры в этом аппарате расположены не над объективом принтера, а под негативом: дело в том, что, поскольку у фильтров имеются паразитные поглощения, их расположение над объективом не только отсекает экспозицию «своего» светочувствительного слоя фотобумаги, но также несколько уменьшает уровень экспозиции двух других слоев. Если расположить фильтры под негативом, то паразитные поглощения этими фильтрами окажут равновеликое влияние как на фотобумагу, так и на фотоэлементы. Как следствие, экспозиционная выдержка увеличится на требуемую величину.

Фильтры должны располагаться так, чтобы тень от них не попадала на негатив (в противном случае можно получить неравномерный хроматический разбаланс на отпечатке): в S1-принтере интегратор светового потока, представляющий собой систему зеркал, расположен между фильтрами и негативом, тем самым гарантируя полное отсутствие затенения.

Любопытно отметить, что лампа S1-принтера расположена в одном из фокусов эллипсоидного отражателя: конденсор собирает свет из другого фокуса и направляет его через фильтры на интегратор. Рассеиватель, расположенный поверх интегратора, выполняет двоякую функцию: во-первых, сводит к минимуму все артефакты негатива

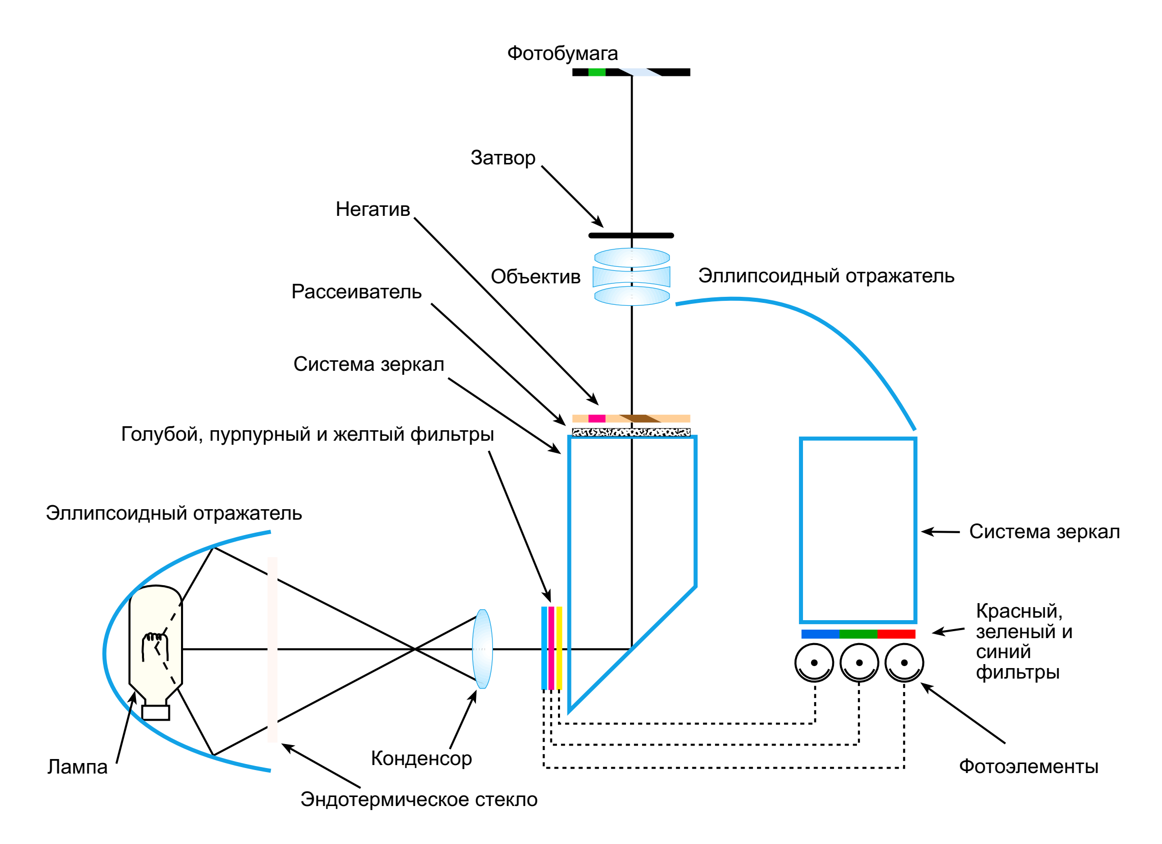


Рис. 16.3 Основные узлы принтера Eastman Kodak S1.

(трещины, царапины, грязь), во-вторых, через отдельный эллипсоидный отражатель направляет часть светового потока на фотоэлементы.

Фотоэлементы принтера расположены соответственно за красным, зеленым и синим фильтрами и непосредственно книзу от светоинтегратора, благодаря чему свет от негатива, падающий на них, оказывается, как говорят, *скремблированным* (тщательно перемешанным. — *Прим. пер.*). Фотоэлементы заряжают три отдельных конденсатора, и регулировка тонального и хроматического балансов будущего отпечатка осуществляется за счет изменения предустановленных значений заряда этих конденсаторов, что в свою очередь меняет время экспозиционной выдержки слоев фотобумаги.

16.10.2 Принтер «Pako»

Второй субтрактивный принтер, разработанный компанией Pako (США), появился на рынке в 1958 г. (Blaxland, 1960). Фильтры в этом принтере располагались между объективом и фотобумагой, экспозиция которой за каждым из них контролировалась фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). Перед ФЭУ вращалось колесо с красным, зеленым и синим фильтрами, свет на которые поступал от светоделителя, расположенного между фотоматериалом и субтрактивными фильтрами аппарата.

16.10.3 Принтер «Eastman Kodak 5S»

Принтер «Eastman Kodak 5S», появившийся на рынке в 1959 г., унаследовал основные принципы работы S1-принтера, но голубой, пурпурный и желтый фильтры в нем

были расположены поверх объектива, а фотоэлементы — книзу от него. Следовательно, фототок не зависел от присутствия того или иного фильтра в световом потоке. Эта особенность аппарата позволяла выполнять т.н. *первичную цветокоррекцию* (Bartleson и Huboi, 1956), что уменьшало величину цветоискажений.

Однако, несмотря на то что последнее — это безусловное достоинство аппарата, достигнуто оно за счет издержек по другим составляющим цветофотографического процесса, в частности по светопотерям, хроматическому балансу негативов и их обработке. Ради возможности первичной цветокоррекции пришлось прибегнуть к методике одновременной фильтрации экспонирующего светового потока всеми тремя фильтрами по среднему негативу (методика, получившая название «экспозиция в ничью»).

16.10.4 Принтер «Eastman Kodak 2620»

Дальнейшее развитие принтеров привело к появлению в конце 60-х годов прошлого века аппарата «Eastman Kodak 2620», скорость работы которого составила от 3000 до 4000 отпечатков в час. Столь высокой скорости удалось добиться за счет применения галогенных ламп накаливания (см. раздел 10.2) с высокоэффективными сферическими зеркалами, а также за счет того, что негативы скреплялись в непрерывную ленту.

16.10.5 Прочие принтеры

В начале 70-х годов на рынке появились принтеры Eastman Kodak 2610 и Eastman Kodak 3510, а также принтеры компании Gretag[1]. Паразитные поглощения затворными фильтрами в этих принтерах компенсировались уже за счет сложных электронных схем.

Наконец, отметим, что производительность современных принтеров измеряется величинами порядка 10000 снимков в час и более.

16.11 ФОТОУВЕЛИЧИТЕЛИ ЦВЕТНОЙ ПЕЧАТИ

Размер отпечатков, выдаваемых первыми промышленными принтерами, как правило, составлял 5" по диагонали (около 10 см), однако некоторые из принтеров могли печатать снимки 5×7" (12×17 см) или даже 8×12" (20×30 см). Сегодня термин «фотоувеличитель», в противоположность термину «принтер», означает не только и не столько устройство, способное увеличивать конечный размер отпечатков, сколько, в первую очередь, менее сложный, чем принтер, и более гибкий в управлении аппарат.

Наиболее широко распространены увеличители, в которых цветность экспонирующего света регулируется простой постановкой пакета фильтров на пути экспонирующего светового потока, причем, как правило, перед негативом, дабы не понизить резкость изображения на отпечатке.

Подбор фильтров и времени экспозиции осуществляется либо методом проб с использованием тест-стрипов (техника, подходящая домашней печати), либо путем измерения интересующих областей на негативе, к примеру средне-серых объектов или кожи. Такие измерения выполняются с помощью денситометра или специального фотоэлектрического устройства, определяющего необходимые экспозицию и марку

1 Не путать с компанией GretagMacbeth. — *Прим. пер.*

фильтров (иногда называемого «спот-монитором»). Устройство устанавливается либо на поверхности негатива, либо на поверхности фотобумаги.

16.12 АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПРИЛАДКА

Внедрение принципа балансировки по серому как в самые простые, так и в максимально сложные аппараты (например, субтрактивные принтеры) стало, пожалуй, главным шагом в развитии любительского сектора фотоиндустрии. Услуги фотолюбителям стали предлагать и фирменные подразделения фотопроизводителей, и независимые фотолаборатории. Высокий уровень качества отпечатков устойчиво достигался с первой попытки, однако вопрос автоматической приладки по тональному и хроматическому балансам (в случаях отклонения плотностей негативов от среднего значения) по-прежнему оставался актуальным: действительно, ручная приладка требует времени и довольно высокой квалификации оператора, поэтому никто не сомневался, что ее автоматизация была бы большим достижением. Необходимость автоматизации была продиктована еще и тем фактом, что во многих странах любительский сектор фотоиндустрии весьма сезонозависим, в связи с чем маловероятно, чтобы автоматическая приладка по оптическим плотностям всегда оказывалась корректной. С другой стороны, даже высококвалифицированные операторы допускают ошибки, и если машина справляется с поставленной задачей по крайней мере не хуже их, то сие можно считать большим шагом вперед.

В современных принтерах приладка по средней оптической плотности выполняется автоматически. В первых автоматических принтерах коэффициент пропускания негатива оценивался по нескольким точкам. К примеру, в принтере «Kodak 2620» (принтер автокласса) он измерялся в верхней, средней и нижней областях кадра; в принтере «Kodak 2610» центральная область негатива сканировалась по 100 точкам; в принтере «Kodak 3510» все те же измерения проводились зонально (за красным, зеленым и синим фильтрами), а приладка тонального и хроматического балансов основывалась на соответствующей комбинации этих измерений.

16.13 СЛОП-КОНТРОЛЬ

⇨ *Слоп-контроль* — это принцип управления тональным и хроматическим балансами отпечатков, выполняемых со слишком плотных (переэкспонированных) и слишком светлых (недоэкспонированных) негативов.

Необходимость такого управления диктуется тремя основными факторами.

16.13.1 Форма характеристических кривых негатива

На хроматический баланс отпечатков серьезное влияние оказывает форма характеристической кривой негативного фотоматериала. Дело в том, что фотоэлементы подвержены большему влиянию теневых элементов сцены, поскольку элементы эти — это светлые области негатива. Однако определяющую роль в хроматическом балансе большинства отпечатков играют средние и высокие тона. Следовательно, до тех пор пока не будет обеспечено постоянство соотношения тонального и хроматического балансов светов негатива с тональным и хроматическим балансом его теней, устойчивого качества отпечатков получить не удастся. Таким образом, любая нелинейность характери-

стических кривых негатива ведет к тому, что хроматический баланс отпечатка будет зависеть от общей оптической плотности негатива. Несколько примеров помогут проиллюстрировать сказанное.

16.13.1.1 Недоэкспонированные негативы

На рис. 16.4 дан набор характеристических кривых типичного цветного негативного фотоматериала с встроенной маской из окрашенных куплеров. На рис. 16.4 (a) показаны участки кривых, которые задействуются на разных уровнях экспозиции при синеватом освещении сцены, на рис. 16.4 (b) — при желтоватом. Проекция отрезка, образованного точками «N» «зеленой» кривой, на ось десятичных логарифмов экспозиции относится к нормально экспонированным сценам и равна 1.6 логарифмических единиц, что типично для среднего десятичного логарифма диапазона фотометрических яркостей уличных сцен (2.2) за вычетом фактора паразитной подсветки фотоаппарата (0.6) (James и Higiigns, 1960).

При повышении уровня экспозиции негатива NN-отрезок смещается по «зеленой» кривой вверх: точки, отмеченные как +1, +2, +3, указывают позиции самых светлых объектов сцены при экспозициях соответственно на одну, две и три ступени выше нормальной (*фотографическая ступень* — это величина, соответствующая повышению/понижению уровня экспозиции в два раза). Аналогично точки, отмеченные как −1, −2 и −3, относятся к позициям глубоких теней сцены при экспозициях соответственно на одну, две или три ступени ниже нормальной. Наборы точек на «красной» и «синей» кривых несут сходную информацию по красно- и синечувствительному слоям фотопленки.

По рис. 16.4 (a) мы видим, что на «синей» кривой точки смещены на одну ступень вверх, а на «красной» кривой — на одну ступень вниз. Сие есть следствие избытка коротковолнового («синего») содержимого в синеватом освещении при одновременном недостатке длинноволнового («красного»).

На рис. 16.4 (b) наблюдаем обратную картину — на «синей» кривой точки смещены на одну ступень вниз (за счет недостатка «синего» содержимого в желтоватом освещении), на «красной» — на одну ступень вверх (за счет избытка «красного»).

По рис. 16.4 (a) мы видим, что при синеватом освещении на недоэкспонированных негативах оптические плотности, измеренные за красным фильтром, в тенях зафиксированной сцены будут ощутимо выше (а за зеленым — слегка выше), чем в случае идеально линейных характеристических кривых (пунктирные линии). В результате принтер даст ощутимо бóльшую экспозицию фотобумаги за красным фильтром и слегка бóльшую — за зеленым (следствием чего явится сине-голубой сдвиг хроматического баланса отпечатков).

При желтоватом освещении сцены (рис. 16.4 [b]) на недоэкспонированных негативах оптические плотности, измеренные за синим фильтром, в тенях зафиксированной сцены будут ощутимо выше (а за зеленым — слегка выше), чем в случае идеально линейных характеристических кривых. В результате принтер даст ощутимо бóльшую экспозицию фотобумаги за синим фильтром и слегка бóльшую — за зеленым (следствием чего явится желто-красный сдвиг хроматического баланса отпечатков).

16.13.1.2 Переэкспонированные негативы

Высокие оптические плотности переэкспонированного негатива не оказывают существенного влияния на экспозиционное «поведение» принтера, однако при синеватом ос-

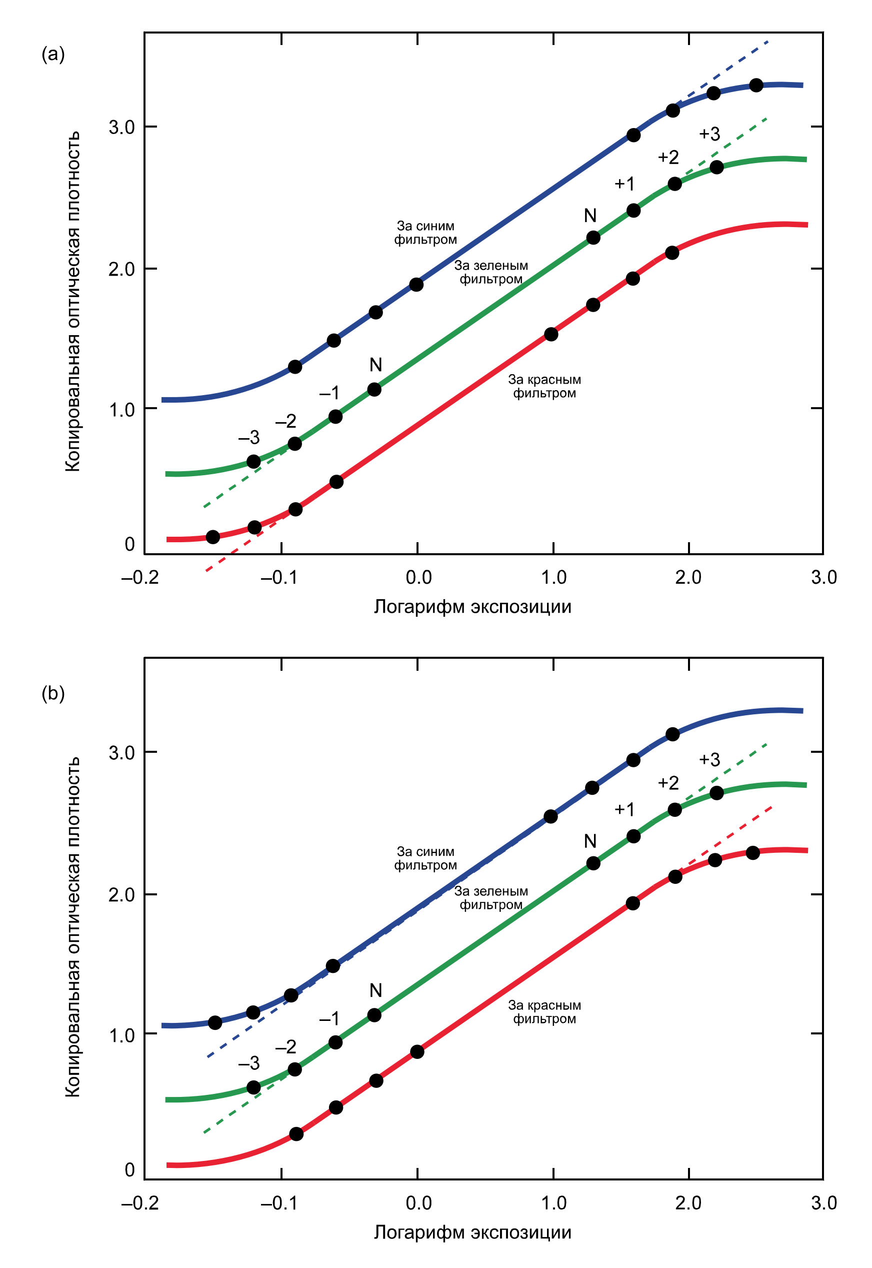


Рис. 16.4 Характеристические кривые негативного фотоматериала с внедренной маской из окрашенных краскообразующих компонент. Точки демонстрируют то, как «ведет» себя фотоматериал на «подошве» и «плече» своих характеристических кривых при недо- и переэкспозиции в пределах трех ступеней:
(a) — экспозиция синеватым светом;
(b) — экспозиция желтоватым светом.

вещении (рис. 16.4 [a]) света сцены, зафиксированные на этом негативе, будут иметь слишком низкую оптическую плотность за синим фильтром и слегка пониженную за зеленым. В результате на отпечатке будет иметь место желто-красный сдвиг в светах. Аналогично при желтоватом освещении (рис. 16.4 [b]): света сцены будут иметь слишком низкую оптическую плотность за красным фильтром и слегка пониженную за зеленым. Результатом явится сине-голубой сдвиг отпечатков в светах.

16.13.1.3 Прочие эффекты

Итак, мы видим, что форма характеристических кривых негатива может повлиять на хроматический баланс отпечатка. Поскольку качество фотографий, выполненных с недо- или переэкспонированных негативов не может быть хорошим по определению, принцип слоп-контроля нацелен в основном на коррекцию недостатков тех негативов, чьи значимые оптические плотности не выходят за крайние позиции подошвы и плеча характеристических кривых, то есть лежат в диапазоне ±3 ступени (восемь крат — 2×2×2) от уровня нормальной экспозиции (см. рис. 16.4).

Отметим также, что любые искривления характеристических кривых нормально экспонированного негатива (если только эти искривления не строго параллельны друг другу на данном уровне экспозиции) могут дать эффекты, аналогичные только что описанным.

Когда характеристические кривые негатива строго линейны, но не параллельны друг другу, то, коль скоро оптическая плотность негатива переменна, достичь стабильности тонового и хроматического баланса отпечатков можно, если система экспозиционного управления в принтере адекватна всем изменениям коэффициента пропускания негатива, измеренного за красным, зеленым и синим фильтрами. Если эта система не столь развита, непараллельность кривых приведет к тональным и хроматическим вариациям в отпечатке, представляющим собой функцию от уровня средней оптической плотности негатива.

16.13.2 Спектральные чувствительности фотоэлементов и фотобумаги

Еще одним фактором, влияющим на слоп-характеристики отпечатков (то есть на наклон их характеристических кривых) является согласованность/несогласованность спектральных чувствительностей систем «фотоэлемент — фильтр» со спектральными чувствительностями слоев фотобумаги.

Если бы каждый из красителей негативного фотоматериала равномерно поглощал бы свет только в «своей» части видимого спектра и каждый из слоев фотобумаги был чувствителен к свету только этих частей, то, обеспечив с помощью фильтров такую же спектральную селективность у фотоэлементов, можно было бы не беспокоиться о спектральной чувствительности последних внутри соответствующих спектральных отрезков.

Однако мы знаем, что кривые спектральной оптической плотности красителей негативных фотоматериалов не П-образны (см. рис. 16.5), то есть у красителей имеют место четко обозначенные пики спектрального поглощения. Если эти пики совпадают по длинам волн с пиками кривых спектральной чувствительности слоев фотобумаги, но при этом максимумы чувствительности соответствующих фотоэлементов лежат вне этих длин волн, то любые изменения концентрации красителей в слоях негатива могут оказать большее влияние на фотобумагу, нежели на фотодатчики. В этом случае повышение экспозиции управляющей системой принтера по мере роста оптической плотности негатива будет недостаточным и, как следствие, недостаточным окажется и выход соответствующего красителя в отпечатке.

Идеальным решением вопроса явился бы такой подбор фильтров для фотоэлементов, что спектральные чувствительности связок «фотоэлемент — фильтр» оказались бы идентичными таковым у слоев фотобумаги. На практике же добиться сего очень трудно, поскольку кривые фотографической чувствительности имеют очень крутой

наклон на длинноволновых сторонах своих спектральных полос, в то время как крутой наклон кривых спектрального поглощения красителей бывает только на коротковолновой стороне их полос пропускания. К сожалению, лучшее, чего можно добиться, — аналогично тому, что показано на рис. 16.6.

16.13.3 Характеристическая невзаимозаместимость фотобумаг

Третьим фактором, обосновывающим необходимость слоп-контроля (касается только принтеров переменной выдержки) является т.н. *характеристическая невзаимозаместимость* цветных фотобумаг.

Поясним.

По опыту работы с черно-белыми фотоматериалами известно, что, к примеру, десятикратное увеличение времени экспозиции хоть и не эквивалентно десятикратному увеличению просвета диафрагмы, но все же достаточно близко к нему. Однако даже легкие отклонения от характеристической взаимозаместимости слоев цветной фотобумаги при увеличении/уменьшении экспозиционной выдержки могут привести к очень серьезным нарушениям хроматического баланса отпечатков.

16.14 МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ СЛОП-КОНТРОЛЯ

В разделе 16.8 было показано, что за счет т.н. шифт-трансформаторов принтера «Kodak 1599» экспозиции за красным, зеленым и синим фильтрами оказываются частично зависимыми от оптической плотности негатива (благодаря чему, собственно, и возможно раздельное управление каждым из экспозиционных каналов и, соответственно, достижение более или менее стабильного тонального и хроматического балансов отпечатков в широком диапазоне оптических плотностей негативов).

Еще одним методом слоп-контроля, который активно применяется в принтерах переменной выдержки, является управление чувствительностью электронных схем в рамках экспозиционного цикла (Pieronek, Syverud и Voglesong, 1956). К примеру: поканальная экспозиция зависит от тока фотоэлемента, но при этом пропорциональна напряжению, до которого должен зарядиться конденсатор, прежде чем сработает механизм отсечки экспозиции. Если это напряжение будет меняться, то (коль скоро сверхплотные негативы требуют более длинной выдержки, нежели светлые) становится возможным управление уровнем экспозиции в зависимости от общей плотности негатива, то есть, становится возможной реализация принципа слоп-контроля.

16.15 ЭЛЕКТРОННАЯ ПЕЧАТЬ

Когда информация об изображении представлена в виде электронных сигналов, то само собой разумеется, что этими сигналами можно легко манипулировать. Было изобретено множество способов фотографической печати, при которых пленки сканируются с помощью сверхмелких точечных красного, зеленого и синего лучей, а результирующие интенсивности этих лучей, зафиксированные с помощью соответствующих светочувствительных датчиков, конвертируются в электронные сигналы.

Электронными сигналами манипулируют с целью повышения качества изображений по параметрам тонального и хроматического балансов, резкости и зернистости, после чего пакет измененных сигналов используют для воспроизведения световых изображений, экспонирующих позитивный материал, либо же с целью активации не-

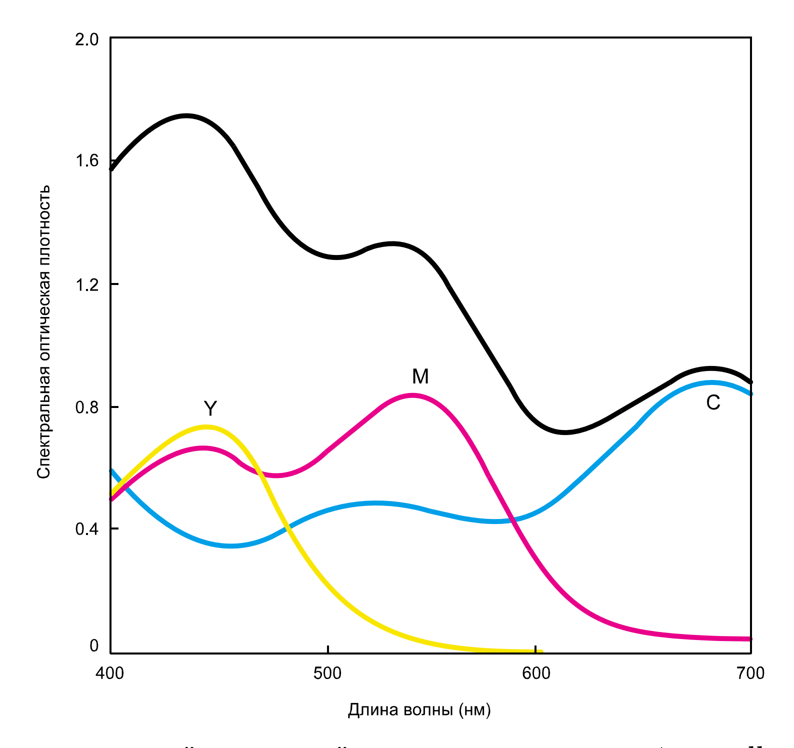


Рис. 16.5 Кривые спектральной оптической плотности cyan-, magenta- и yellow-красочных изображений, сформировавшихся из оптически активных краскообразующих компонент в негативном фотоматериале с внедренной маской. CMY-кривые представляют спектральные оптические плотности красителей, объединенные со спектральными оптическими плотностями неизрасходованных окрашенных куплеров при средней оптической плотности негатива. Верхняя кривая (как результат суммирования CMY-кривых) демонстрирует результат экспонирования данного фотоматериала светом, отраженным от нейтрально-серого объекта.

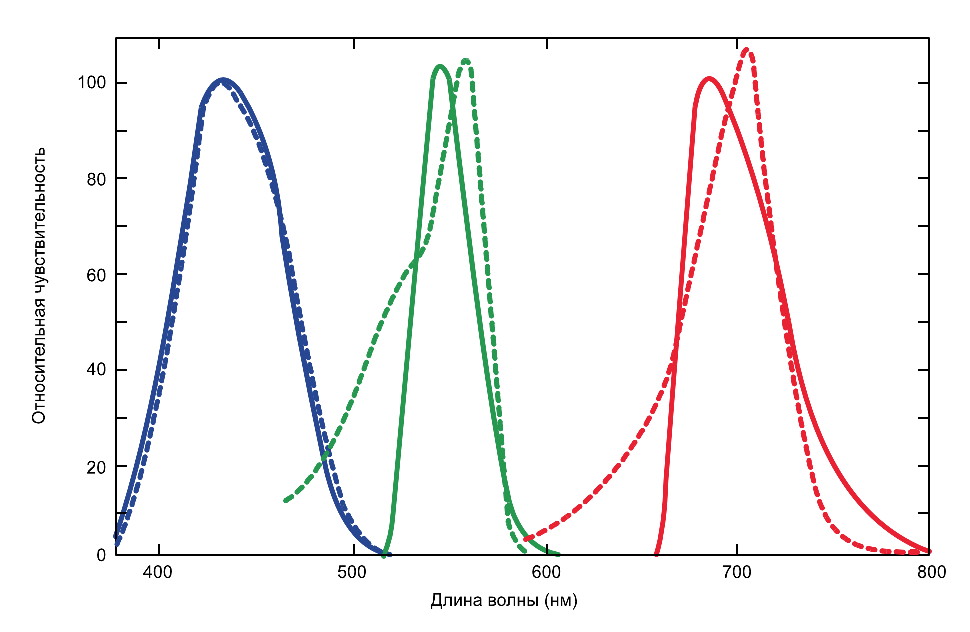


Рис. 16.6 Типичные кривые спектральной чувствительности слоев цветной фотобумаги (пунктирные линии) и систем «фотоэлемент — красный фильтр»; «фотоэлемент — зеленый фильтр»; «фотоэлемент — синий фильтр» (сплошные линии) типичного фотопринтера.

оптических печатающих устройств (например, струйных или лазерных принтеров. — *Прим. пер.*).

Сканирование оригинала и последующее экспонирование печатного материала можно выполнить с помощью лазерных лучей, отклоняемых зеркалами гальванометра, вращающимися призмами или иными специальными устройствами, как то сделано в *цветных лазерных принтерах* (Sealfon, 1979). Вместо лазеров можно использовать электронно-лучевые трубки. Альтернативно при сканировании оригиналов могут применяться массивы CCD-элементов (ПЗС-массивы), а при экспонировании — лазерные электрофотографические, термотрансферные, термовосковые или струйные системы (см. гл. 33). Последние позволяют осуществлять идеальное тональное управление отпечатком и идеальное маскирование, то есть воспроизводить изображения наивысшего качества (см. также раздел 33.18).

Манипулируя пространственными группами сигналов, можно снизить зернистость изображения и повысить его резкость. Одним из методов является пропускание этих сигналов через двухмерные полосовые фильтры, что позволяет оценить средний градиент оптических плотностей соседних элементов изображения в областях различного размера и ориентации. Зернистость понижают путем т.н. *пороговой обработки*, а повышение резкости осуществляют за счет усиления тех сигналов, что несут пространственно высокочастотную информацию (см. рис. 16.7) (Powell и Beyer, 1982; Hunt, 1985).

Принтеры, способные выполнять оба типа операций, очень сложны в устройстве, особенно если это скоростные принтеры, однако методы обработки изображений, реализованные в них, очень и очень эффективны, и мы можем говорить, что эти аппараты объединяют в себе элементы телевизионной технологии (см. Часть III «Цветное телевидение») и технологии полиграфических сканеров (см. гл. 29).

Обсуждаемые функции также обеспечиваются системой Photo CD (см. раздел 24.8).

Отметим, что все перечисленные манипуляции с изображением осуществимы также и тогда, когда электронные сигналы получены не только с пленки, но непосредственно с электронной фотокамеры (см. разделы 13.6 и 20.15).

Возможность манипулировать сигналами позволяет использовать электронные системы в качестве имитаторов любых изменений, возникающих в цветорепродукционной системе, к примеру, производители фотоматериалов могут использовать электронные имитаторы при изучении воздействия на качество изображения изменений формы характеристических кривых фотоматериала, межслойных эффектов (включая частичную экспозицию того или иного слоя светом «чужой» цветности) и т.д.

Изучение эффектов изменения спектральной чувствительности фотопленки требует фактического изготовления этой пленки, однако непредвиденные изменения в экспериментальных пленках (например, изменение формы характеристической кривой) можно откорректировать с помощью устройства-имитатора.

Эффекты изменения цветности красителей в материале, используемом для создания финального изображения, также можно проимитировать, но только в рамках колориметрического охвата фактического материала, задействованного в устройстве-имитаторе. В одном из таких имитаторов для регистрации с фотооригинала использован оптический сканер (см. раздел 23.9), а для последовательного экспонирования позитива (в роли которого выступает цветная пленка или фотобумага) через красный, зеленый и синий фильтры — монохромная электронно-лучевая трубка разрешением 1312×798 (Giorgianni, 1984; Hailey, 1984; Wood, Attridge, Pointer и Jacobson, 1991).





Рис. 16.7 *Вверху:* копия отпечатка, выполненного обычным способом с негатива размером 12×16 мм, экспонированного при неблагоприятных условиях освещения; сильное увеличение. *Внизу*: то же изображение после электронной обработки, при которой промежуточные сигналы были откорректированы с целью улучшения тонального и хроматического балансов изображения, повышения его резкости и уменьшения зернистости (см. раздел. 16.15).

Оригиналы любезно предоставлены Eastman Kodak Research Laboratories.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Bartleson, C.J., Phot. Sci. Eng., 2, 32 (1958).

Bartleson, C.J., and Huboi, R.W., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 65, 205 (1956).

Blaxland, J., Brit. J. Phot., 107, 638 (1960).

British Journal of Photography, Brit. J. Phot., 119, 166 (1972).

Evans, R.M., J. Opt. Soc. Amer., 33, 579 (1943).

Evans, R.M., British Patent 660,099; U.S. Patent 2,571,697 (1946).

Giorgianni, E., Video simulation and photography, paper presented at ISCC-GATF Conference on Color and Imaging, Williamsburg (1984).

Hailey, K., Photographic and Electronic Image Quality, Cambridge Symposium, the Royal Photographic Society, p.161 (1984).

Hunt, R.W.G., J. Phot. Sci., 8, 212 (1960).

Hunt, R.W.G., Physics in Technology, 16, 12 (1985).

James, T.H., and Higgins, G.C., Fundamentals of Photographic Theory, 2nd Edn., pp. 237 and 241, Morgan and Morgan, New York (1960).

Pieronek, V.R., Syverud, W.L., and Voglesong, W.F., Photogr. Sci. Techn. (P.S.A. Technical Quarterly Series II), 3, 145 (1956).

Pinney, J.E., and DeMarsh, L.E., J. Phot. Sci., 11, 249 (1963).

Pitt, F.H.G., and Selwyn, E.W.H., Phot. J., 78, 115 (1938).

Powell, P.G., and Beyer, B.E., IEE (London) Conference Publication No. 214, Electronic Image Processing, p. 179 (1982).

Richardson, A.W., Brit. J. Phot., 105, 639 (1958).

Sealfon, P., New York Times, p. 41, March 11 (1979).

Thomas, W., Waz, E.M., and Dreyfoos, A.W., Brit. Kinematog. Sound Tel., 52, 202 (1970).

West, P.A., Brit. J. Phot., 118, 724 (1971).

Wood, C.A., Attridge, G.G., Pointer, M.R., and Jacobson, R.E., J. Phot. Sci., 39, 127 (1991).

17 ХИМИЯ ЦВЕТНЫХ ФОТОМАТЕРИАЛОВ

17.1 ЦВЕТНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ

17.1.1 Первичное цветное проявление

Давно известно, что некоторые проявляющие вещества, широко применяемые в обработке обычных черно-белых фотоматериалов, прокрашивают серебряное изображение. К примеру, пирогаллол оставляет после себя коричневые зерна, количество которых пропорционально количеству восстановленного серебра, и которые выглядят как изображение красочное — в данном случае в роли красителя выступает полимер окисленного пирогаллола. Отметим, что описанный способ образования красочных изображений иногда называют *первичным цветным проявлением*.

17.1.2 Автокуплерное цветное проявление

Еще одним вариантом получения красочных изображений является т.н. *автокуплерное цветное проявление*, при котором молекулы проявляющего вещества реагируют с его окисленной формой, образовавшейся после восстановления галоидного серебра. Понятно, что само проявляющее вещество в этом случае должно быть бесцветным.

В 1907 г. немецкий химик Бенно Гомолка (Benno Homolka) обнаружил, что когда в качестве проявляющих соединений используются индоксил и тиоиндоксил, то вдобавок к серебряному эти вещества образуют синее и красное красочные изображения, состоящие соответственно из индиго- и тиоиндиго-красителей.

Вместе с тем ни одна из описанных выше систем не используется в цветной фотографии, поскольку либо сами проявляющие вещества, либо образуемые ими красители (либо и то, и другое) не удовлетворяют требованиям трихроматического принципа цветовоспроизведения.

17.1.3 Вторичное цветное проявление

Большинство современных цветофотографических процессов построены на том, что принято называть *вторичным цветным проявлением*, при котором краситель образуется благодаря реакции сочетания окисленного проявляющего вещества с некой самостоятельной субстанцией — *краскообразующей компонентой* (*куплером*).

Итак, отличия между тремя возможными типами фотографического краскообразования проиллюстрирует следующая схема:

$Ag^{+}Br^{-}$ + проявляющее вещество $\rightarrow$ Окисленное проявляющее вещество в качестве нерастворимого красителя + $Ag + H^{+} + Br^{-}$

Ag^+Br^- + проявляющее вещество	→	Окисленное проявляющее вещество + проявляющее вещество → нерастворимый краситель	+ Ag + H^++Br^-
Ag^+Br^- + проявляющее вещество	→	Окисленное проявляющее вещество + краскообразующая компонента (куплер) → нерастворимый краситель	+ Ag + H^++Br^-

Мы видим, что во всех трех случаях наряду с образованием серебряных и красочных изображений ионы водорода и брома уходят в раствор.

В 1912 г. немецкие исследователи Рудольф Фишер (Rudolf Fisher) и Иоганн В. Зигрист (Johann W. Siegrist) первыми продемонстрировали технологию вторичного цветного проявления на основе бесцветных краскообразующих компонент. Интересно то, что труд Фишера и Зигриста заложил основу большинства современных цветофотографических систем, в которых молекулы красителя *синтезируются* в процессе проявления. Любопытно также, что современная цветная фотография пользуется лишь одним типом проявляющих веществ (из двух предложенных Фишером и Зигристом) и двумя типами красителей (из пяти предложенных).

NH_2—C_6H_4—OH

Парааминофенол

NH_2—C_6H_4—NH_2

Парафенилендиамин (парааминоанилин)

Два класса проявляющих соединений, описанных Фишером и Зигристом, — это производные парааминофенола и парафенилендиамина (или же сами эти реагенты):

При восстановлении серебряного изображения красители образуются в присутствии соответствующих краскообразующих компонент:

Индофеноловые красители: O=C_6H_4=N—C_6H_4—OH

Индоанилиновые красители: O=C_6H_4=N—C_6H_4—NR_2

Индаминовые красители: NH=C_6H_4=N—C_6H_4—NR_2

Индотиофеноловые красители: O=C_6H_4=N—C_6H_4—SH

Азометиновые красители: (X)(Y)C=N—C_6H_4—NR_2

где R представляет какую-либо алкильную группу, например метильную (CH_3), этильную (C_2H_5) и т.п.

Заметим, что красители данных пяти классов были хорошо известны и ранее, но Фишер и Зигрист оказались теми, кто обнаружил, что скрытое фотографическое изображение может выступить в роли *катализатора* реакции синтеза красителей из краскообразующей компоненты и проявляющего вещества. Было выявлено также, что индоанилиновые и азометиновые красители обладают всеми необходимыми цветной фотографии свойствами, а красители оставшихся трех классов страдают серьезными недостатками, в частности индаминовые красители образуются слишком медленно, а спектральный коэффициент поглощения индофенолов чувствителен к изменениям pH среды (кислотность/щелочность). Итак, поскольку только парафенилендиамин (и его производные) способен образовывать индоанилиновые и азометиновые красители, это соединение получило широкое распространение в качестве *цветного проявляющего вещества*. Парааминофенол используется значительно реже.

17.2 ПРОЯВЛЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Добротное проявляющее соединение:

— должно достаточно быстро реагировать со скрытым серебряным изображением;

— должно демонстрировать высокую избирательность между экспонированными и неэкспонированными зернами галоидного серебра (то есть у проявленного изображения уровень вуали должен быть очень низким);

— должно образовывать красители высокой стабильности, с требуемым спектральным коэффициентом поглощения;

— не должно быстро разрушаться под действием кислорода или иных окислителей.

К сожалению, сам по себе парафенилендиамин не удовлетворяет большинству перечисленных требований и потому практически не нашел себе применения. Вместо парафенилендиамина в цветной фотографии используются его производные. Вместе с тем, коль скоро сочетание с краскообразующей компонентой происходит за счет свободной аминогруппы (NH_2), то, независимо от химического состава производных парафенилендиамина, свободная аминогруппа всегда должна присутствовать в химической структуре проявляющего агента. В итоге в качестве цветных проявляющих веществ стали применяться только те производные парафенилендиамина, в которых оба атома водорода одной из аминогрупп заменены алкильными группами (R), то есть:

Простейшими представителями являются N:N-диалкил-парафенилендиамины:

N:N-диметил-парафенилендиамин (парааминодиметиланилин)

N:N-диэтил-парафенилендиамин (парааминодиэтиланилин)

Второй из них (N:N-диалкил-парафенилендиамин) долгое время активно применялся на практике.

В процессе работы проявляющее вещество должно отдавать электрон иону серебра. Было выявлено, что добавка алкильной группы к бензольному кольцу в *орто* положение к «сцепной» аминогруппе (т.е. связывающейся с куплером) облегчает эту отдачу, повышая тем самым активность проявляющего вещества и сокращая время проявления. В результате общая структура цветных проявляющих веществ приобрела следующий вид:

и в частности:

4-амино-3-метил-N:N-диэтиланилин (диэтил-паратолуилендиамин)

Отметим, что серьезным недостатком таких проявляющих веществ является их токсичность, в частности способность вызывать кожные раздражения (т.н. токсические дерматиты). Более того, тот, кто регулярно подвергается воздействию этих веществ, не приобретает резистентности к ним, но напротив — сенсибилизируется. Поэтому в свое время были приложены огромные усилия к тому, чтобы синтезировать производные парафенилендиамина, не наносящие вреда кожным покровам (в результате чего на свет появились соединения, отличные друг от друга по химической структуре алкилов замещенной аминогруппы). В итоге общая структура проявляющих соединений приобрела следующий вид:

где R и R′ — алкильные группы; R″ — алкиленовая группа, несущая замещающую группу X. Примером может служить:

Производные парафенилендиамина легко окисляются кислородом воздуха и поэтому выпускаются в виде солей или комплексов, что обеспечивает их относительную

химическую стабильность и достаточную растворимость в водно-щелочных средах. Последнее облегчает введение этих агентов в проявляющие растворы. Ниже мы приводим примеры наиболее распространенных цветных проявляющих веществ:

NH_2–C_6H_4–$N(C_2H_5)_2 \cdot HCl$

Цветное проявляющее вещество «Kodak CD1»

NH_2–$C_6H_3(CH_3)$–$N(C_2H_5)_2 \cdot HCl$

Цветное проявляющее вещество «Kodak CD2»

NH_2–$C_6H_3(CH_3)$–$N(C_2H_5)(C_2H_4NHSO_2CH_3) \cdot 3/2\ H_2SO_4 \cdot H_2O$

Цветное проявляющее вещество «Kodak CD3»

NH_2–$C_6H_3(CH_3)$–$N(C_2H_5)(C_2H_4OH) \cdot 3/2\ H_2SO_4 \cdot H_2O$

Цветное проявляющее вещество «Kodak CD4»

Обращаем внимание на то, что метиленсульфонамидная ($NHSO_2CH_3$) группа CD-3 (Color Developer 3) наиболее эффективно препятствует проникновению проявляющего вещества в кожные покровы.

17.3 КРАСКООБРАЗУЮЩИЕ КОМПОНЕНТЫ

Если цветные проявляющие вещества — это в основном лишь производные парафенилендиамина (паратолуилендиамина), то структура краскообразующих компонент гораздо разнообразнее (Bergthaller, 2002). По химическому строению куплеры можно разделить на три основных группы:

1. Соединения с ациклической активной метиленовой группой (....—CH_2—....).
2. Соединения с активной метиленовой группой в составе цикла (—CH_2—).
3. Фенольные соединения с активной метиновой группой (—CH=).

Компоненты, образующие *yellow-краситель*, обычно относятся к первой группе, *magenta-краситель* — к первой и второй группам, *cyan-краситель* — к третьей.

Общая структура *yellow-красителей* обычно такова: X—CH_2—Y, где X = RCO, а Y = R′CO или R′NHCO. Реакция сочетания yellow-компоненты с цветным проявляющим веществом происходит за счет вытеснения из первой двух атомов водорода:

Куплер

Цветное проявляющее вещество

Азометиновый краситель

Наиболее практичным классом соединений, из которых могут состоять *magenta-образующие* компоненты, являются производные пиразолона:

где Ar — ароматическая группа (содержит бензольное кольцо) и X — какая-либо иная органическая группа. Так же как и в случае образования желтого красителя, реакция сочетания компоненты, образующей magenta-краситель, с цветным проявляющим веществом происходит за счет вытеснения из первой двух атомов водорода:

Цветное проявляющее вещество

Куплер

Азометиновый краситель

Реакция сочетания феноловой *суап-образующей компоненты* с цветным проявляющим веществом происходит за счет вытеснения из бензольного кольца атома водорода, находящегося в параположении к гидроксилу (—OH). Простейшие представители соединений этого класса — фенол (слева) и *а*-нафтол (справа):

HO HO

В последнем случае общая структура суап-образующих компонент выглядит так:

X HO Y

где X и Y — различные органические группы, а реакция сочетания с проявляющим веществом имеет следующий вид:

X HO H + NH_2 N C_2H_5 C_2H_5 + $4Ag^+Br^-$ → Y CH_3

Куплер

Цветное проявляющее вещество

→ X O = N N C_2H_5 C_2H_5 + 4Ag + $4H^+$ + $4Br^-$ Y CH_3

Индоаналиновый краситель

Атом водорода в связующей позиции куплера стараются заместить атомом хлора, и в этом случае реакция сочетания идет по следующей схеме:

X HO Cl + NH_2 N C_2H_5 C_2H_5 + $2Ag^+Br^-$ → Y CH_3

Куплер

Цветное проявляющее вещество

$$\rightarrow \text{(краситель)} + 2Ag + Cl^- + 3H^+ + 2Br^-$$

Индоаналиновый краситель

Мы видим, что вновь образуется тот же самый краситель, но при этом каждая молекула проявляющего вещества восстанавливает серебро лишь из двух молекул его бромида (а не из четырех, как в первом случае). То есть эквивалентное количество красителя оказывается полученным за счет половинного количества скрытого серебряного изображения.

17.3.1 Требования к краскообразующим компонентам

Стоит сказать, что в свое время были испытаны тысячи различных видов куплеров различной химической структуры. При этом критериями оценки их прикладной ценности являлись:

— скорость реакции сочетания с цветным проявляющим веществом;
— растворимость;
— подвижность;
— спектральный коэффициент поглощения;
— растворимость образуемого красителя;
— стабильность образуемого красителя;
— спектральные свойства образуемого красителя.

17.3.1.2 Скорость реакции сочетания с цветным проявляющим веществом

Высокая скорость реакции краскообразующей компоненты с окисленным проявляющим веществом очень важна, в противном случае последнее рано или поздно начнет диффундировать из зерен экспонированного серебра и снижать резкость результирующего изображения (или даже придавать ему паразитный оттенок, если диффузия пойдет в соседние слои фотоматериала). Высокая скорость реакции сочетания важна еще и потому, что длительное проявление попросту нетехнологично и неудобно. Понятно, что высокая скорость желательна в большинстве процессов, в которых со сходными скоростями формируются три красочных изображения.

Отметим также, что скорость реакции сочетания в первую очередь должна зависеть от количества галогенида серебра, окисляющего проявляющее вещество, однако и прочие особенности структуры краскообразующей компоненты (помимо присутствия/отсутствия атома галогена в активной позиции) в данном контексте также весьма важны.

17.3.1.3 Растворимость

Когда компонента образует очень большое количество красителя, то в связке с ним же она может образовать т.н. *конкурирующий куплер*, который, реагируя с окисленным проявляющим веществом, способен превратиться в растворимое соединение, лег-

ко выходящее из слоев фотоматериала в раствор (в результате чего результирующий выход красителя снижается).

17.3.1.4 Подвижность

Краскообразующие компоненты, находящиеся в проявляющих растворах (*Kodachrome*-процесс — К-14), а не в слоях фотоматериала, должны растворяться в водно-щелочных средах и свободно проходить через желатиновые слои фотопленки, то есть молекулы компонент должны быть достаточно малы.

С другой стороны, когда куплер в эмульсионных слоях диспергирован в виде масляных капель, как, скажем, в пленках *Kodacolor*, он должен обладать определенной растворимостью в маслах, в частности таких, как трикрезилфосфат, трифенилфосфат, *n*-бутилфталат или *n*-гексилбензоат.

Если куплеры непосредственно диспергированы в эмульсии (как, скажем, в фотопленках *Agfa*), то, чтобы предотвратить их паразитную диффузию между слоями, молекулы компонент должны быть достаточно крупными, что достигается добавкой к их химической структуре т.н. «балластных» групп (последние не могут пройти сквозь губчатоподобную сеть желатинового слоя).

Отметим, что «балластная» добавка требуется даже тогда, когда краскообразующие компоненты диспергированы в виде масляных капель.

17.3.1.5 Спектральный коэффициент поглощения

В большинстве случаев требуется, чтобы краскообразующая компонента была бесцветной, то есть чтобы участки фотоматериала, не содержащие изображения, были прозрачными. Однако в некоторых негативах, как мы знаем, с целью компенсации паразитных поглощений красителями используются т.н. *оптически активные* (окрашенные) *краскообразующие компоненты* (см. раздел 17.4). Оптическая активность также достигается за счет изменения их химического строения.

17.3.1.6 Растворимость будущего красителя

Красители, образуемые реакцией сочетания куплеров с цветным проявляющим веществом, не должны растворяться в водных средах (за исключением тех процессов, в которых краситель покидает слой, несущий серебряное изображение, и переходит на специальный приемный лист, содержащий протраву [см. раздел 13.2] — после реакции с ней красители должны терять растворимость).

17.3.1.7 Стабильность образуемого красителя

Образованный краситель должен быть устойчив к воздействию света, тепла и влаги. Несмотря на то что полная стабильность любого органического красителя недостижима, мы говорим, что используемые сегодня краскообразующие компоненты образуют красители, стабильность которых адекватна большинству задач.

17.3.1.8 Спектральные свойства образуемого красителя

Спектральный коэффициент поглощения образуемого красителя должен быть максимально приближен к идеальному в контексте данного цветорепродукционного процесса. На рис. 17.1 дан ряд примеров того, как спектральный коэффициент погло-

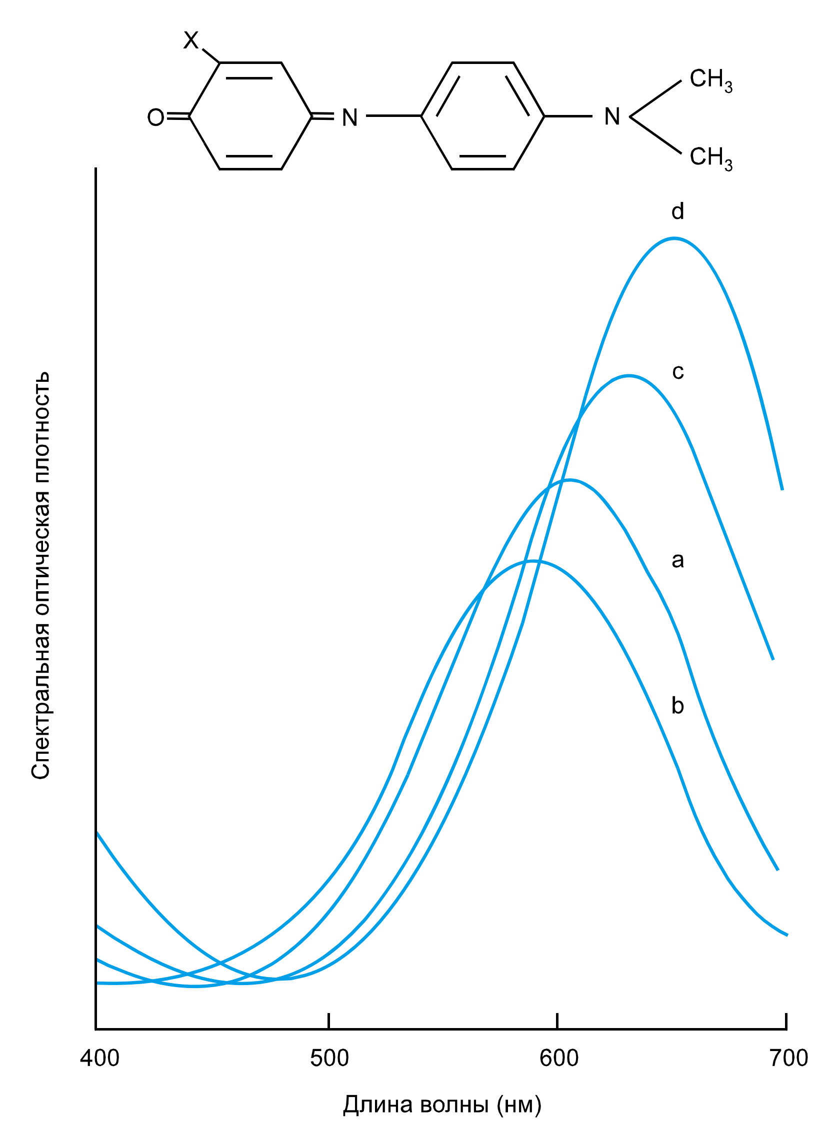


Рис. 17.1 Кривые спектрального коэффициента поглощения красителей, построенных на основе фенолового синего. «X» в случае (a) означает атом водрода (собственно феноловый синий); в случае (b) — метильную группу (CH_3); в случае (c) — атом хлора (Cl); в случае (d) — $CH{=}CHCOC_6H_5$ (Evans, Hanson и Brewer, 1953).

щения красителя меняется за счет разных добавок к главной химической структуре последнего. Спектральный коэффициент поглощения красителя зависим также от того, в какой физической форме он находится в фотографическом слое (о чем речь пойдет в разделе 17.6).

17.3.2 Химическое строение современных краскообразующих компонент

Итак, нет ничего удивительного в том, что в свое время химики затратили массу сил на обеспечение соответствия свойств краскообразующих компонент изложенным выше требованиям.

17.3.2.1 Yellow-образующие компоненты

Наиболее практичными куплерами, образующими желтые красители, оказались производные ацилацетамида:

$RCOCH_2CON<$ a, b

Примером послужит:

C_6H_5—$RCOCH_2CONH$—$C_6H_3(OC_{15}H_{31})$—SO_3H

ω-бензоилацето - (2-n-пентадецилокси) - 4 - сульфоанилид

В качестве «балластной» здесь выступает пентадецильная группа ($C_{15}H_{31}$), в то время как остаток моносульфокислоты (SO_3H) придает куплеру определенную гидрофильность (водорастворимость), а его раствору — кислую реакцию. Последнее обеспечивает тропность куплера желатиновому слою. Однако сравнительно недавно были синтезированы yellow-образующие компоненты, обладающие радикально большей устойчивостью к световому воздействию и имеющие следующую общую химическую структуру:

$(CH_3)_3CCOCH_2CONH$—$C_6H_3(Cl)$—$NHCOCH_2O$—$C_6H_3(C_5H_{11}(t))$—$C_5H_{11}(t)$

α-пивалоил-5-[α'-(2,4-дитэртиарипентилфенокси)ацетамидо]-2-хлороацетанилид

17.3.2.2 Magenta-образующие компоненты

Большинство magenta-образующих компонент по-прежнему относятся к классу пиразолоновых производных. Примером может служить:

C_6H_5CONH — C — CH_2; C=N, CH_2—C=O; N—N(C_6H_5)

1-фенил-3-бензамидопиразолон-5

Дабы снизить тенденцию неиспользованных куплеров данного класса плавно желтеть по мере снижения просмотровой освещенности, стали использовать куплер следующей структуры:

1-(2,4,6 трихлорофенил)-3-бензамидопиразолон-5

Мы видим, что у данной компоненты отсутствует крупная балластная группа, и, следовательно, данный куплер больше подходит к использованию в *проявляющих растворах*, нежели в *слоях* фотоматериала.

17.3.2.3 Cyan-образующие компоненты

Примером балластированной cyan-образующей компоненты служит следующее производное нафтола:

1-стеароиламидо-4 (1'-гидрокси-2'-нафтоиламидо)-бензол-3-сульфокислота

В данном примере сульфогруппа (SO_3H) обеспечивает тропность куплера желатину, а $C_{17}H_{35}$ является балластом, препятствующим межслойной диффузии вещества. Повышению темновой стабильности cyan-красочных изображений способствует использование куплера следующей химической структуры:

2-m-хлорофенилуреидо-5-[α-(m-пентадецилфенокси)бутирамидо]фенол

17.4 ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ КРАСКООБРАЗУЮЩИЕ КОМПОНЕНТЫ

Мы знаем, что весьма удобным нецифровым методом цветокоррекции является маскирование, реализованное за счет оптически активных краскообразующих компонент (см. раздел 15.4). Компоненту можно окрасить путем добавки к ее химической структуре т.н. *хромофорной группы*. Маскирование в этом случае реализуется при условии, что спектральный коэффициент поглощения компоненты пропорционален концентрации этой компоненты, то есть доле *неизрасходованного* куплера в изображении (de Ramaix, 1971).

17.4.1 Добавка хромофорной группы после проявления

Одним из способов синтеза оптически активных краскообразующих компонент является добавка хромофорной группы, осуществляемая *после* проявления. К примеру, если несвязанная magenta-образующая компонента (без вреда для magenta-изображения) превращается в желтый краситель, то желтое позитивное изображение, образованное неиспользованным magenta-куплером, может эффективно отмаскировать негативное magenta-изображение.

Примером реализации данного принципа является процесс *Icicolor*: magenta-образующая стирил-пиразолоновая компонента, нагретая с ароматическим альдегидом *до* полива на подложку, смешивается с желтым стириловым красителем и альдегид-*бис*-пиразолоном. При цветном проявлении желтый краситель полностью разрушается (причем независимо от присутствия галогенида серебра, активированного экспонирующим светом), и окисленное проявляющее вещество, сочетаясь с куплером, на экспонированных участках кадра образует magenta-краситель (что и требуется). Однако дальнейшее взаимодействие с формальдегидом ресинтезирует желтый краситель в тех областях кадра, в которых краскообразующая компонента не была задействована (в результате чего и происходит требуемое маскирование).

Аналогичным путем, но уже за счет присутствия формальдегида в стоп-ванне (следующей за цветным проявителем), в cyan-слое образуется розовая маска. Одновременное присутствие формальдегида и цветного проявляющего вещества (последнее автоматически переносится вместе с пленкой в стоп-ванну) приводит к тому, что cyan-куплер образует некое промежуточное соединение, которое в кислой отбеливающей ванне превращается в требуемую розовую маску (Gehret, 1964; Ganguin и MacDonald, 1966).

17.4.2 Добавка хромофорной группы до проявления

Еще одним способом маскирования с помощью оптически активных краскообразующих компонент является добавка к химической структуре куплера хромофорной группы, выполняемая *до* проявления фотоматериала, а также такая организация реакции сочетания краскообразующей компоненты с цветным проявляющим веществом, что в результате образования красителя куплер теряет свою исходную окраску (которая остается лишь в тех местах кадра, где присутствует неизрасходованная краскообразующая компонента). Сказанное реализуется за счет добавки хромофорной группы в активную позицию куплера, в результате чего цветное проявление представляет собой процесс замены этой группы на цветное проявляющее вещество, к примеру:

C_6H_5CONH — C — CH-N=N-C_6H_5 + NH_2 — (кольцо, CH_3) — N(C_2H_5)(C_2H_4OH) + $2Ag^+Br^-$ ⟶

Оптически активная краскообразующая компонента

Цветное проявляющее вещество

⟶ C_6H_5CONH — C — C=N — (кольцо, CH_3) — N(C_2H_5)(C_2H_4OH) + C_6H_5 + 2Ag + $2H^+$ + $2Br^-$ + N_2

Азометиновый краситель

Очевидно, что в том случае, когда вместо одного из атомов водорода в активной позиции куплера присутствует атом хлора, замещение хромофорной группы цветным проявляющим веществом ведет к расходу лишь двух молекул бромида серебра на одну молекулу красителя. Сие весьма практично в работе со смесью, состоящей из окрашенных и неокрашенных куплеров, поскольку, управляя относительными величинами последних, можно с очень высокой точностью контролировать количество колоранта в свободных от изображения участках кадра.

17.5 РЕАКЦИЯ СОЧЕТАНИЯ КУПЛЕРА С ЦВЕТНЫМ ПРОЯВЛЯЮЩИМ ВЕЩЕСТВОМ

Следует сказать, что приведенные ранее уравнения реакции сочетания краскообразующей компоненты с цветным проявляющим веществом весьма упрощенны: на самом деле в фактическом процессе образуется ряд промежуточных соединений, некоторые из которых весьма нестабильны и, следовательно, существуют лишь очень непродолжительно время. В частности, проявляющее вещество, реагируя с ионами серебра, окисляется до хинондиимина, который существует в растворе в виде двух взаимно обратимых резонансно-стабилизированных соединений:

H_2N — (кольцо) — NR_2 + $2Ag^+$ ⟶ H-N^+ — (кольцо) — NR_2 + 2Ag + H^+

Очевидно, что в высокощелочном растворе проявителя (pH 10—12) хинондиимин способен к связыванию с краскообразующей компонентой. В результате вначале образуется некое бесцветное соединение (т.н. *лейкосоединение):*

Йон куплера Йон хинондиимина Лейкосоединение

которое затем окисляется до собственно красителя:

$2Ag^+$ Окисление

Лейкосоединение Азометиновый краситель

Заметим, что хинондиимин и его семихиноновый предшественник находятся в конкурентном состоянии по отношению к краскообразующей компоненте.

17.6 ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КРАСОЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

17.6.1 Гранулярность/Равномерность

Когда краситель залегает в слоях фотоматериала в виде крупных гранул с большими промежутками между ними (к примеру, вокруг крупных зерен серебра), возникает точно такое же дробление результирующего цветового стимула, как и в случае полиграфической полутоновой растровой печати (Pollak, 1955; Pollak и Hepher, 1956). Плюс к тому высокие концентрации красителя в отдельных участках изображения резко усиливают эффекты паразитных поглощений в сравнении с областями низких концентраций этого же красителя (Gledhill и Julian, 1963), пример тому дан на рис. 17.2.

Когда же краситель распределен в слое достаточно равномерно и без пустот (чего можно добиться, если красочное изображение состоит из облаков красителя, расположенных в несколько слоев), — поглощение будет аналогично тому, как если бы краситель находился в растворе (см. рис. 30.2). Изредка в такой ситуации краситель демонстрирует даже более острую, чем в растворе, полосу поглощения, пик которой оказывается сдвинутым в сторону коротких длин волн (рис. 17.3). И первое, и второе обычно

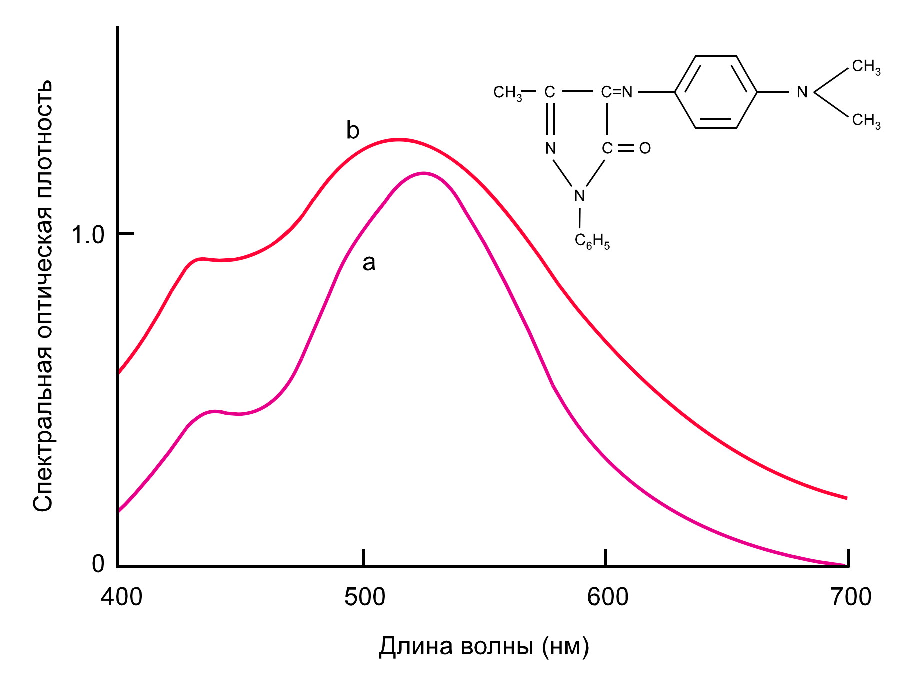


Рис. 17.2 Кривые спектрального коэффициента поглощения красителя: (a) — растворенного в метаноле; (b) — залегающего в виде глобул в фотографическом изображении (Vittum и Weissberger, 1954).

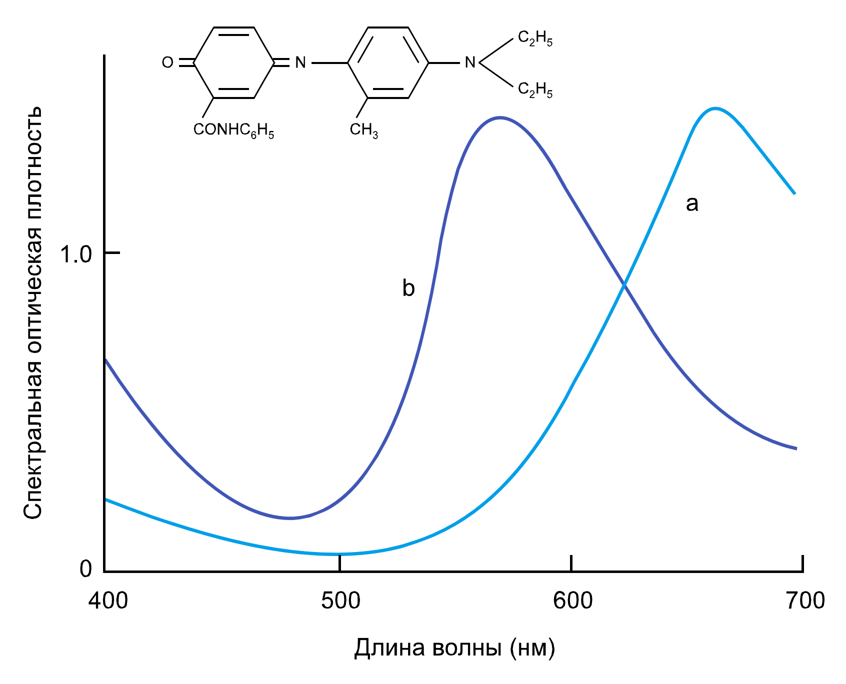


Рис. 17.3 Кривые спектрального коэффициента поглощения красителя: (a) — растворенного в метаноле; (b) — залегающего в виде микрокристаллов в фотографическом изображении (Vittum и Weissberger, 1954).

указывает на то, что краситель находится не в обычной, аморфной, а в микрокристаллической форме.

17.6.2 Переотражения

Еще одним физическим фактором, влияющим на спектральный коэффициент поглощения красочного изображения, является количество световых переотражений (см. раздел 13.9), поскольку последние могут усиливать паразитные поглощения красителей в изображениях, выполненных на отражающих носителях.

17.7 ЦВЕТНЫЕ ПРОЯВЛЯЮЩИЕ РАСТВОРЫ

Помимо собственно проявляющего агента раствор цветного проявителя должен содержать еще ряд компонентов, речь о которых пойдет ниже.

17.7.1 Щелочи и буферные соединения

Поскольку большинство проявляющих веществ взаимодействуют со скрытым изображением только в щелочной среде, рекомендуется использовать подходящие щелочи, например углекислый натрий (карбонат натрия) или каустическую соду (едкий натр). Однако помимо щелочей необходимы т.н. *буферные соединения*, удерживающие pH раствора на более или менее постоянном уровне. В роли буферов (т.е. веществ, *поддерживающих* должный уровень pH) обычно выступают смесь карбоната натрия с бикарбонатом натрия (бикарбонат обычно образуется в результате реакции карбоната с солью проявляющего вещества), смесь метабората и тетрабората натрия или же смесь двухосновного и трехосновного фосфатов натрия.

17.7.2 Антиоксиданты

В роли антиоксиданта (консерванта), предохраняющего цветное проявляющее вещество от частичного окисления кислородом воздуха, выступает небольшое количество сульфита натрия (отметим, что инертное бесцветное соединение, образованное в результате реакции сульфита с проявляющим веществом, гораздо менее вредно проявителю, чем некоторое количество окисленного проявляющего вещества, провоцирующего дальнейшее окисление проявляющего агента и приводящее в конечном счете к появлению коричневых пятен на изображении).

17.7.3 Антивуаленты

Вещества, снижающие тенденцию зерен галоидного серебра к самопроявлению, носят название *антивуалирующих веществ* (*антивуалентов*). В качестве антивуалентов чаще всего используются ионы брома, вводимые в раствор проявителя в виде бромида калия. Также вместе с последним (либо вместо него) могут применяться органические антивуаленты.

17.7.4 Прочие добавки

Прочие химические вещества добавляются к раствору цветного проявителя с целью получения различных эффектов, в частности:

— предотвращения образования пятен путем снижения оптической плотности недопроявленных участков изображения;

— сдерживания активности цветного проявляющего вещества и снижения выхода того или иного красителя (а порой наоборот — акселерации проявления).

Для реализации последнего обычно применяют т.н. вещества — *активаторы проявления*, такие, как тиоцианат, растворяющий галогенид серебра, и бензиловый спирт, ускоряющий реакцию сочетания в ряде процессов.

Отметим также, что некоторые добавки способствуют усилению полезных межслойных эффектов (см. раздел 15.5).

17.8 ОТБЕЛИВАЮЩАЯ И ФИКСИРУЮЩАЯ ВАННЫ

По завершении реакции образования красителя, то есть по завершении цветного проявления (в том случае, когда перенос красителя на иную подложку не предполагается), фотоматериал (с целью удаления химических остатков, отрицательно сказывающихся на финальном изображении) должен пройти серию ванн. То есть из слоев фотоматериала необходимо удалить серебряное изображение, которое, если останется на прежнем месте, сильно затемнит изображение красочное. Плюс к тому должен быть удален и неизрасходованный галогенид серебра, поскольку он имеет свойство самовосстанавливаться на свету (из-за чего изображение со временем может равномерно потемнеть или покрыться темными пятнами).

Металлическое серебро при отбеливании в специальном окисляющем растворе, например растворе ферроцианида калия, окисляется до иона серебра (то есть переходит в состояние, в котором оно находилось в составе бромида).

И самое окисленное серебро, и неиспользованный его галогенид удаляются в *фиксирующей ванне*, представляющей собой раствор тиосульфата натрия (гипосульфита натрия).

Реакция отбеливания на базе ферроцианида выглядит так:

$$Ag + K_3Fe(CN)_6 + KBr \rightarrow AgBr + K_4Fe(CN)_6$$

В фиксирующем растворе происходит следующий процесс:

$$AgBr + Na_2S_2O_3 \rightarrow NaAgS_2O_3 + NaBr$$

$$NaAgS_2O_3 + Na_2S_2O_3 \rightarrow Na_3[Ag(S_2O_3)_2]$$

Соединение, образующееся в результате последней реакции, водорастворимо и легко уходит из слоев фотоматериала в фиксирующий раствор.

Альтернативным отбеливающим агентом может также служить дихромат калия, а в качестве альтернативного фиксирующего вещества иногда используется тиосульфат аммония $(NH_4)_2S_2O_3$, позволяющий повысить скорость реакции в тех случаях, когда эмульсионные слои содержат йодиды.

17.8.1 Бликс-раствор

В некоторых ситуациях весьма практичной оказывается комбинированная отбеливающе-фиксирующая ванна (т.н. бликс-раствор). Если бликс-раствор используется однократно, а затем сливается, то приготовлять его можно простой смесью ферроцианида с гипосульфитом. Однако эта смесь скоро портится и поэтому в традиционной обработке фотоматериалов чаще применяются комплексные соединения железа. В

бликс-растворах данного типа трехвалентное железо находится в составе комплекса этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА·Fe^{3+}), что предотвращает реакцию железа с гипосульфитом.

17.9 ЭТАПЫ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ФОТОМАТЕРИАЛОВ

Как было показано выше, для получении красочного изображения в негативной фотографической эмульсии, необходимы как минимум две ванны: раствор цветного проявителя и бликс-раствор. После обработки фотоматериала в бликс-растворе обычно требуется промывка, позволяющая удалить из слоев фотоматериала остатки ионов серебра. Плюс к тому порой возникает необходимость в промывке между проявляющей и бликс-ваннами, дабы избежать загрязнения последней остатками проявителя. На практике, однако, обычно не удается свести химическую обработку цветных фотоматериалов к собственно двум ваннам (т.е. к четырехступенчатой процедуре: два раствора/две промывки), и часто к основным обрабатывающим ваннам добавляются вспомогательные, речь о которых пойдет ниже.

17.9.1 Стоп-фиксирующая ванна

Вместо промывки между проявляющим и бликс-растворами предпочтительна т.н. *стоп-фиксирующая ванна*, которая ощутимо эффективнее, чем водная промывка, изолирует проявляющее вещество от бликс-агентов. Плюс к тому стоп-фиксирующая ванна обеспечивает резкую остановку процесса проявления, т.е. четко контролирует его финальную точку. Также мотивом к использованию отдельной стоп-фиксирующей ванны является то, что останавливающая способность бликс-растворов достаточно ограниченна.

Стоп-фиксирующая ванна основана на смеси бисульфита натрия (задающего кислотность) с тиосульфатом натрия (обеспечивающим реакцию фиксирования), что позволяет не только удалить неактивированный (и, следовательно, непроявленный) галогенид серебра на данной стадии процесса, но и резко остановить проявление. Таким образом, в последующей бликс-ванне будут происходить отбелка и фиксирование только того серебра, что было восстановлено в процессе образования красочных изображений. Итак, получаем три раствора:

— проявитель,
— стоп-фиксаж,
— бликс;

и, соответственно, четыре стадии процесса:

— проявление,
— остановка-фиксирование,
— отбеливание-фиксирование,
— промывка.

17.9.2 Стабилизатор

Описанные выше процедуры весьма эффективно выводят из слоев фотоматериала паразитные серебряные изображения, а также неиспользованный галогенид серебра. Однако после обработки материалов с внедренными краскообразующими компонентами, в слоях всегда остаются неизрасходованные куплеры. В идеале нужно уда-

лить и их, однако простого и дешевого способа экстрагирования краскокомпонент не существует.

Тем не менее фотоматериал можно обработать в растворе т.н. *стабилизатора*, разработанного специально с целью снижения тенденции неиспользованных краскообразующих компонент визуально проявлять себя в ущерб качеству результирующего изображения. К примеру, погружение фотоматериала в щелочную формалиновую ванну иногда предотвращает реакцию неиспользованного куплера с красочным изображением, реконвертируя этот куплер в его лейкоформу. Кроме того, формалин обладает способностью задубливать желатин, тем самым повышая механическую прочность последнего и, следовательно, предотвращая появление царапин на изображении.

17.9.3 Кондиционер

Давно замечено, что светостойкость красочных изображений радикально растет, когда кислотность слоев фотоматериала приведена к некоему буферному значению. Такой вид обработки, носящий название *кондиционирования,* может также снизить тенденцию неиспользованных куплеров к перемене своих спектральных коэффициентов пропускания под воздействием света (последнее визуально проявляет себя в постепенном пожелтении изображения).

Таким образом, наивысшая стабильность фотографического изображения чаще всего достигается за счет введения в описанный выше трехрастворный процесс стабилизирующей и/или кондиционирующей ванн, превращая последний в четырех- или пятиванновый процесс. Когда же добавляются еще две промывочных операции, общее количество шагов увеличивается до семи:

— проявка,
— стоп-фиксирование,
— промывка,
— отбеливание-фиксирование (бликс),
— промывка,
— стабилизация,
— кондиционирование.

17.9.4 Дубяще-фиксирующая ванна

В целом не существует противопоказаний к объединению фиксирующей и стабилизирующей ванн за счет добавки тиосульфата натрия (или аммония) к щелочному раствору формалина (тем самым получается щелочная дубяще-стабилизирующая ванна). В этом случае вместо бликс-раствора используется собственно отбеливающий раствор. Порой такая тактика дает ощутимые преимущества: дело в том, что на стадии проявления некоторые красители весьма неохотно переходят из лейкосоединения в свою конечную форму (окисляются), а отбеливатель в таком случае как раз и выступает в роли окисляющего агента (что используется с целью принудительного завершения реакции образования красителя).

17.9.5 Стоп-ванна

Очевидно также, что при наличии в процессе фиксирующей и стабилизирующей ванн необходимость в фиксировании перед отбеливанием отпадает, и стоп-фиксирующий раствор можно заменить обычным кислым стоп-раствором. Иногда, правда, про-

являющее вещество начинает абсорбироваться на зернах непроявленного галогенида серебра, причем так прочно, что стоп-ванна и/или промывка не могут удалить его; в результате при окислении проявляющего вещества в отбеливающей ванне на изображении образуются паразитные пятна. Следовательно, пятирастворный процесс, задействующий отбеливающую ванну вместо бликс-раствора, должен выглядеть так:

— проявление,
— стоп-фиксирование,
— промывка,
— отбеливание,
— промывка,
— фиксирование и стабилизация в щелочном формалиновом растворе,
— промывка,
— кондиционирование.

Наконец, разделяя стоп-фиксирование и стабилизацию-фиксирование, мы получаем семирастворный процесс, который с учетом четырех промывок включает в себя одиннадцать последовательных операций:

— проявление,
— стоп-ванна,
— фиксирование,
— промывка,
— отбеливание,
— промывка,
— фиксирование,
— промывка,
— стабилизация,
— промывка,
— кондиционирование.

17.9.6 Конфигурация процесса химической обработки фотоматериала

Процесс химической обработки фотоматериала зависит от множества факторов: от типа эмульсии, химического состава куплеров, требуемой степени стабильности финального изображения, типа проявочной машины и относительной значимости стоимости, скорости и удобства получения финального изображения. К примеру, при работе с материалами, в которых не содержится краскообразующих компонент, цветное проявление проходит трижды соответственно при образовании голубого, пурпурного и желтого красочных изображений; в обращающих процессах цветному проявлению предшествуют черно-белое негативное проявление и вуалирующая (обращающая) ванна, между которыми, как правило, имеют место стоп-ванна[1] и промывка.

Иногда вместо отдельной обращающей ванны вуалирующее вещество вводят в состав цветного проявителя.

Отметим, что этап черно-белого негативного проявления можно организовать так, что оно будет запускать механизм возникновения полезных межслойных эффектов (см. раздел 15.5).

---

[1] Наиболее популярный сегодня процесс обработки цветных обращаемых фотопленок «E-6» использует совмещенную обращающую стоп-ванну. — *Прим. пер.*

17.9.7 Время обработки

Время пребывания фотоматериала в той или иной ванне можно уменьшить путем повышения температуры рабочих растворов. Поскольку процесс химической обработки цветных фотоматериалов в целом длится дольше, чем процесс обработки материалов черно-белых, стандартная «черно-белая» температура растворов (20°C) часто заменяется на 24°C, 30°C, а порой даже на 38°C и более (в специальных случаях).

Понятно, что с целью обеспечения устойчивости к таким высоким температурам фотоматериалы должны быть определенным образом задублены, что выполняют либо при их изготовлении, либо на первом этапе обработки, т.е. в дубящей ванне (после которой иногда сразу же следует нейтрализующая ванна, подготавливающая фотоматериал к проявлению). К примеру, последовательность обработки цветных обращаемых фотопленок с внедренными краскообразующими компонентами может быть следующей (Beilfuss, Thomas и Zuidema, 1966):

— дубление,
— нейтрализация,
— первое (ч/б) проявление,
— первая стоп-ванна,
— промывка,
— цветное проявление с одновременным обращением (за счет вуалирующего агента в растворе цветного проявителя),
— вторая стоп-ванна,
— промывка,
— отбеливание,
— фиксирование,
— промывка,
— стабилизация.

Отметим, что в данном случае фиксирующая и стабилизирующая ванны не объединены и что отсутствует кондиционирующий раствор.

Высокая температура проявляющих растворов неизбежно влечет за собой изменения как в структуре фотоматериалов, так и в составе проявляющих ванн, поскольку применяемое в этих случаях сверхзадубливание слоев фотопленок снижает диффузию растворов в слои. По этой причине невозможно изготовить цветной фотоматериал, дающий одинаковые результаты при разных температурах проявляющих ванн (Fritz, 1971).

17.9.8 Противоореольные слои и их обработка

С целью получения максимально резких изображений в пленки обычно вводится т.н. *противоореольный слой*, который поглощает свет, отражаемый задней поверхностью подложки пленки. К примеру, заднюю поверхность подложки можно покрыть тонким *защитным слоем* желатина, содержащим красители, которые при съемке поглощают свет, но распадаются или обесцвечиваются в процессе химической обработки фотоматериала. Иногда между нижним слоем эмульсии и подложкой кладут слой восстановленного серебра, который удаляется благодаря отбеливанию и фиксированию.

Не менее распространенным вариантом противоореольного слоя является слой, представляющий собой коллоид угля в смоле, нанесенный на заднюю поверхность подложки. Слой изготовлен так, что в щелочах подвергается гидролизу, отчего размягчается в проявителе и легко удаляется. При этом, как правило, требуется механическая про-

тирка поверхности пленки, дабы гарантировать полное удаление защиты. Выполнять сие удобнее в некоей предварительной ванне, а не в самом проявителе, следовательно, процессы, ориентированные на работу с такими пленками, должны включать в себя щелочную «пред»-ванну и стадию механической чистки материала. Отметим, что механическая очистка технологична только тогда, когда обрабатываемая пленка обладает достаточной длиной (поэтому сажевая защита применяется либо в кинопленках, либо в тех ситуациях, когда фотопленки перед обработкой соединяются в длинную ленту).

17.9.9 Обработка звуковой дорожки кинопленок

Когда пленка несет звуковую дорожку, зачастую требуется, чтобы дорожка эта представляла собой сугубо серебряное изображение, поскольку все красочные в той или иной степени пропускают инфракрасное излучение (к которому чувствительны фотоэлементы звуковой системы кинопроектора). Следовательно, обработка того края кинопленки, который несет на себе записанную или впечатанную звуковую дорожку, требует особого подхода.

Проблема решается путем применения растворов, активных в отношении только звуковой полосы кинопленки. К примеру, перед цветным проявлением в описанный выше процесс обработки цветной обращаемой пленки с внедренными краскообразующими компонентами вводят операцию фиксирования звуковой дорожки (благодаря чему удается избежать ее паразитного обращения), а после отбеливания — операцию черно-белого проявления (дабы избежать влияния на дорожку основного фиксажа). В итоге область звуковой дорожки понесет негативное серебряное изображение без какого-либо красочного компонента.

Отметим, что звуковую дорожку можно организовать за счет cyan-красочного изображения, если на фотоэлемент подается свет длинноволнового (красного) лазера.

17.10 КРАСКООБЕСЦВЕЧИВАЮЩИЕ И КРАСКОВЫВОДЯЩИЕ СИСТЕМЫ

В фотографических системах, основанных на изобретении Фишера и Зигриста, красочные изображения формируются в слоях фотоматериала в процессе проявления серебряного изображения. Однако вполне удовлетворительные результаты можно получить и тогда, когда в слои вводятся *готовые красители*. Модуляции концентраций этих красителей (несущие визуальную информацию о сцене) обеспечиваются управляемым распадом или выведением последних из слоев фотоматериала (динамика чего есть функция от серебряного фотографического изображения).

17.10.1 Gaspacolor- и Cibachrome-процессы

Одним из методов, реализующих описанный выше принцип, является метод, при котором восстановленное в процессе проявления серебро используется при обесцвечивании азо-красителей в присутствии галоидоводородных кислот. Реакция выглядит так:

$$\underset{\text{Азо-краситель}}{RN{=}NR' + 4H^{+}Cl^{+} + 4Ag} \xrightarrow{\text{Органический катализатор}} \underset{\text{Отбеленный краситель}}{RNH_2 + R'NH_2} + 4Ag^{+}Cl^{+}$$

В данном случае краситель в большей степени обесцветится там, где материал сильнее экспонирован, и, следовательно, позитивное изображение получается напрямую. Разумеется, с целью удаления остатков галоидного серебра после отбеливания потребуется фиксирование.

Процесс данного типа иногда называют *Gaspacolor*-процессом, поскольку его основные принципы в 1934 г. запатентовал венгерский исследователь Бэла Гаспар (Bela Gaspar). Отметим также, что в период с 1953 по 1962 г. промышленное применение гаспаровского изобретения было организовано компанией Ilford: описанный принцип использовался в производстве обращаемых фотобумаг, т.е. на которых при печати со слайда образовывалось позитивное изображение (Collins, 1960; British Journal of Photography, 1962). Процесс обработки этих бумаг включал в себя:

— проявление,
— фиксирование,
— отбеливание (т.е. обесцвечивание) красителей,
— фиксирование.

Ванна, отбеливающая краситель, несла в себе некий комплексон, обычно тиомочевину $(NH_2)CS(NH_2)$, которая, образуя комплексное соединение с катионом серебра, удерживала концентрацию последнего на низком уровне и, следовательно, поддерживала ход вышеприведенной реакции.

Функция органического катализатора (обычно использовался 2,3-диаминофеназин) состояла в снижении его собственной концентрации под воздействием серебра и последующем реокислении (за счет чего и обесцвечивался краситель). Отметим, что без катализатора не обойтись, поскольку и краситель, и серебро нерастворимы в водных средах.

В *Cibachrome*-версии гаспаровского процесса красители обесцвечивались за счет межслойных эффектов, вызванных добавкой катализатора в проявитель, а не в отбеливатель (Meyer, 1965 и 1974).

17.10.2 Polarcolor-процесс

17.10.2.1 Общий принцип

Альтернативным гаспаровскому является принцип изменения растворимости красителей в водных средах в зависимости от концентрации восстановленного серебра в эмульсионном слое, то есть в этом случае функцией от серебряного изображения становится растворимость красителя. К примеру, в системе *Polarcolor* (Crawley, 1963) эксплуатируется растворимость пирокатехина или гидрохинона, меняющаяся в зависимости от меры участия этих веществ в восстановлении галогенида серебра. Так, к примеру, гидрохинон, будучи слабой кислотой, присутствует в щелочных средах в виде аниона (отрицательно заряженный ион), который весьма активен как проявляющий агент. Однако в результате восстановления активированного светом галоидного серебра гидрохинон окисляется до хинона, обладающего низкой растворимостью, то есть:

$$HO{-}C_6H_4{-}OH + 2NaOH \longrightarrow [O{-}C_6H_4{-}O]^{--} + 2Na^{+} + 2H_2O$$

Нерастворим в кислой среде — Растворим и активен

$$[O-C_6H_4-O]^{--} + 2Ag^+Br^- \longrightarrow O=C_6H_4=O + 2Ag + 2Br^-$$

Нерастворим

Если молекулу красителя каким-то образом связать с молекулой гидрохинона, то растворимостью такой комбинации можно управлять описанным выше способом, то есть понуждать краситель терять водорастворимость в областях, прилегающих к зернам восстановленного серебра. Процесс можно представить уравнением:

$$RN=N-C_6H_3(OH)_2 + 2NaOH \longrightarrow RN=N-C_6H_3(O^-)_2 + 2Na^+ + 2H_2O$$

Азо-краситель-гидрохинон (нерастворим в кислой среде)

Азо-краситель-гидрохинон-йон (растворим и активен)

$$RN=N-C_6H_3(O^-)_2 + 2Ag^+Br^- \longrightarrow RN=N-C_6H_3(=O)_2 + 2Ag + 2Br^-$$

Азо-краситель-гидрохинон-йон (растворим и активен)

Азо-краситель-хинон (нерастворим)

После образования водонерастворимого красителя водорастворимый его остаток вымывается в щелочной раствор. Восстановленное серебро отбеливается и фиксируется обычным путем.

Водонерастворимого красителя образуется больше там, где больше восстановленного серебра, и, следовательно, распределение красочного изображения оказывается прямо пропорциональным распределению изображения серебряного. В результате на выходе получается негатив.

Вместе с тем описанную выше систему можно использовать для получения прямого позитивного изображения, но на этот раз применяя уже водорастворимый краситель.

В этом случае после отмачивания в щелочи, необходимом для активации и растворения гидрохинона, материал вступает в тесный контакт с приемным листом, содержащим протраву. Перейдя на приемный лист, растворенный краситель реагирует с протравой и становится нерастворимым в водных средах. В данном случае из тех участков фотоматериала, где восстановленного серебра меньше, выйдет большее количество красителя, в результате чего на приемном листе образуется позитивное изображение.

Описанная организация процесса хороша тем, что паразитное серебряное изображение, а также неиспользованный галогенид серебра остаются в оригинальном материале (последний затем механически удаляется); обработка, следовательно, сокращается до двух простых операций (проявление и перенос красителя на приемный лист), общее время выполнения которых удалось свести к одной минуте.

17.10.2.2 Структура фотоматериала

Схема работы системы *Polarcolor* дана на рис. 17.4: негативный материал состоит из трех слоев галоидного серебра, сенсибилизированных определенным образом и политых в традиционной последовательности (т.е. красночувствительный слой — на подложке, зеленочувствительный — поверх него, синечувствительный — снаружи). При этом книзу от каждого светочувствительного слоя располагается слой, состоящий из красителя и проявителя: cyan-краситель — книзу от красночувствительного слоя, magenta-краситель — книзу от зеленочувствительного и yellow-краситель — книзу от синечувствительного (см. рис. 17.4). Слой, содержащий yellow-краситель выступает в роли обычного желтого фильтрового слоя, защищающего красночувствительный и зеленочувствительный слои от воздействия коротковолнового (синего) компонента экспонирующего света.

17.10.2.3 Обработка фотоматериала

Негатив, представляющий собой единичный кадр, проявляется прямо внутри фотоаппарата. Процесс проявления запускается протягиванием фотоматериала (вместе с приемным листом) между двумя прижимными роликами. Приемный лист прикреплен к негативу мелкими каплями вязкой щелочи — протяжка через щель между роликами раздавливает капли, позволяя щелочи активировать систему «краситель — проявитель». Активированные молекулы системы «краситель — проявитель» начинают диффундировать по всем направлениям, но преимущественно в сторону приемного листа (благодаря падению градиента их концентрации в данном направлении). В тех местах, где молекулы связки «краситель — проявитель» сталкиваются с зернами активированного светом галогенида серебра и где начинается восстановление последнего, краситель теряет растворимость и, следовательно, прекращает диффузию (что необходимо при получении позитивного изображения).

Однако получение корректного цветного изображения требует также, чтобы процесс превращения красителей из водорастворимой формы в водонерастворимую был специфичен в каждом из слоев, то есть, к примеру, молекулы соединения cyan-краситель-гидрохинон должны терять растворимость на зернах активированного галогенида серебра, находящихся только в красночувствительном слое. С целью достижения сего в системе Polarcolor используются т.н. *буферные* (прокладочные) слои, то есть, прежде чем молекулы cyan-краситель-гидрохинон начнут заполнять собой зеленочувствительный слой, они должны пройти через собственный слой, специальный буферный слой и слой, содержащий молекулы magenta-краситель-гидрохинона. Понятно, что такой диффузии понадобится гораздо большее время, чем заполнению зеленочувствительного слоя молекулами «родного» ему magenta-красителя (последнее происходит моментально). Следовательно, к тому моменту, как молекулы cyan-краситель-гидрохинона достигнут зеленочувствительного слоя, последний окажется более или менее заполненным молекулами magenta-краситель-гидрохинона, и никакого (или почти никакого) эффекта от диффузии молекул cyan-краситель-гидрохинона не возникнет. Сходным образом сраба-

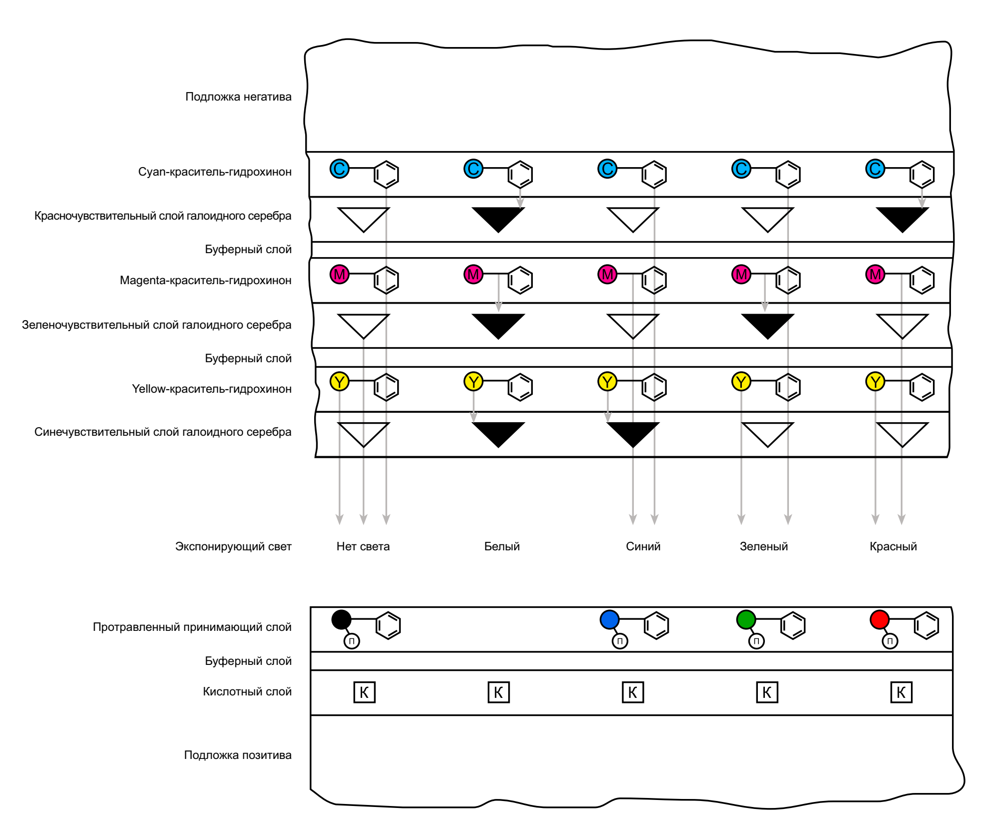


Рис. 17.4 Общая схема *Polacolor*-процесса.

тывает защита от диффузии молекул magenta-краситель-гидрохинона и cyan-краситель-гидрохинона в синечувствительный слой *Polarcolor*-материала, равно как и от возвратной диффузии молекул yellow-краситель-гидрохинона в зелено- и красночувствительный слои.

17.10.2.4 Приемный лист

Структура приемного листа показана в нижней части рис. 17.4: верхний слой содержит протраву, лишающую растворимости молекулы краситель-гидрохинона, выходящие из слоев негативного материала. Если, допустим, в приемном листе более никаких веществ не содержится, то красочное позитивное изображение, перешедшее с негатива, окажется резко щелочным, поскольку вместе с растворенным красителем переносится и щелочь. Резкощелочные отпечатки крайне неприятны на ощупь, и плюс к тому щелочная среда отрицательно сказывается на стойкости полученного изображения. Следовательно, очевидна необходимость нейтрализации щелочи, что выполняет нижний слой приемного листа, содержащий молекулы кислоты, заблокированные от диффузии длинными балластными группами. Буферный слой между протравным и кислотным слоями снижает скорость наполнения последнего щелочью, позволяя негативу и протравному слою оставаться резко щелочными на протяжении всего времени проявления. По истечении этого времени щелочь наполняет кислотный слой, реагирует с кислотой и образует воду, заполняющую буферный слой и способствующую реакции нейтрализации.

17.10.3 Процесс Polarcolor SX70

17.10.3.1 Структура фотоматериала

В 1972 г. появилась новая версия Polarcolor-процесса (SX70), в которой негативный и приемный материалы были собраны в единый шестнадцатислойный «сэндвич» (в результате чего после проявления приемный лист отделялся вручную). Поскольку полученное изображение рассматривалось с той же стороны материала, с которой падал экспонирующий свет, в фотоаппарат (имевший изогнутую форму) было вмонтировано зеркало, позволявшее получить на отпечатке прямое (а не зеркальное) изображение.

17.10.3.2 Обработка фотоматериала

После экспонирования Polaroid автоматически пропускал «сэндвич» между прижимными валиками, раздавливавшими капли обрабатывающего раствора. Проявитель диффундировал в воздушный зазор между соседними слоями (откуда диффузия уже шла по разным слоям фотоматериала), давая цветное позитивное изображение меньше чем за одну минуту. Общая структура материала была аналогична той, что показана на рис. 17.4, но при этом, напомним, приемный лист был плотно скреплен с негативом (Land, 1972).

Поскольку процесс обработки фотоматериала протекал вне аппарата, на время проявления требовалось защитить этот материал от воздействия света. Защита осуществлялась с помощью непрозрачного слоя, расположенного между подложкой негатива и слоем cyan-краситель-гидрохинона, а также за счет специального красителя в каплях обрабатывающего раствора. Краситель оставался черным в резкощелочной среде (то есть в начале процесса), но полностью обесцвечивался в нейтральной, то есть по завершении обработки. Черный краситель диффундировал в светочувствительные слои (и между ними) и, совместно с непрозрачным слоем, защищал их от внешнего света.

Понятно также, что ко всему прочему системе требовался белый светорассеивающий слой, на котором рассматривалось результирующее изображение, поэтому капли обрабатывающего раствора (помимо черного красителя) содержали также и полимер, который в процессе обработки фотоматериала отвердевал и образовывал (между защитным слоем и перенесенным из негатива красочным изображением) белый слой диоксида титана. Подложка приемного слоя была прозрачной, и результирующее изображение хорошо просматривалось через нее.

И последнее. Поскольку скорость диффузии веществ зависит от температуры среды, то, чтобы компенсировать данный эффект, в буферные слои пришлось внедрить некие полимеры, температурный коэффициент которых был таков, что полимер понижал скорость диффузии веществ при повышении температуры (British Journal of Photography, 1972).

17.10.4 Instant Kodak-процесс

17.10.4.1 Общий принцип

В системе моментальной цветной фотографии *Instant Kodak*, продававшейся в период с 1976 по 1986 гг. (Hanson, 1976), результирующее изображение рассматривалось со стороны, противоположной той, на которую падал экспонирующий свет, м поэтому не было необходимости в специальном зеркале (хотя в некоторых моделях ка-

мер использовалась система из двух зеркал, позволяющая уменьшить физический размер аппарата).

17.10.4.2 Структура фотоматериала

Структура фотоматериала показана на рис. 17.5.

Свет из объектива проходил через специальное прозрачное покрытие, затем через тонкий воздушный зазор (в который позднее вводился густой обрабатывающий раствор), через слой, поглощающий ультрафиолетовое излучение, после чего заполнял сине-, зелено- и красночувствительный слои, в соседстве с каждым из которых находилось по слою неподвижного красителя (и из которых в дальнейшем шла диффузия желтого, пурпурного и голубого красочного изображений). Между каждым светочувствительным и красочным слоями находился слой, поглощавший окисленное проявляющее вещество. Вся система была покрыта непрозрачным черным слоем, отражающим белым слоем и, наконец, слоем приемным. За перечисленными слоями располагалась прозрачная полиэфирная подложка, покрытая снаружи специальным защитным слоем.

Сенсибилизированные участки светочувствительных зерен галоидного серебра были направлены внутрь (то есть скрытое изображение формировалось на внутренней стороне этих зерен), что давало возможность получать *позитивные* серебряные изображения (в отличие от негативных серебряных изображений Polarcolor-системы).

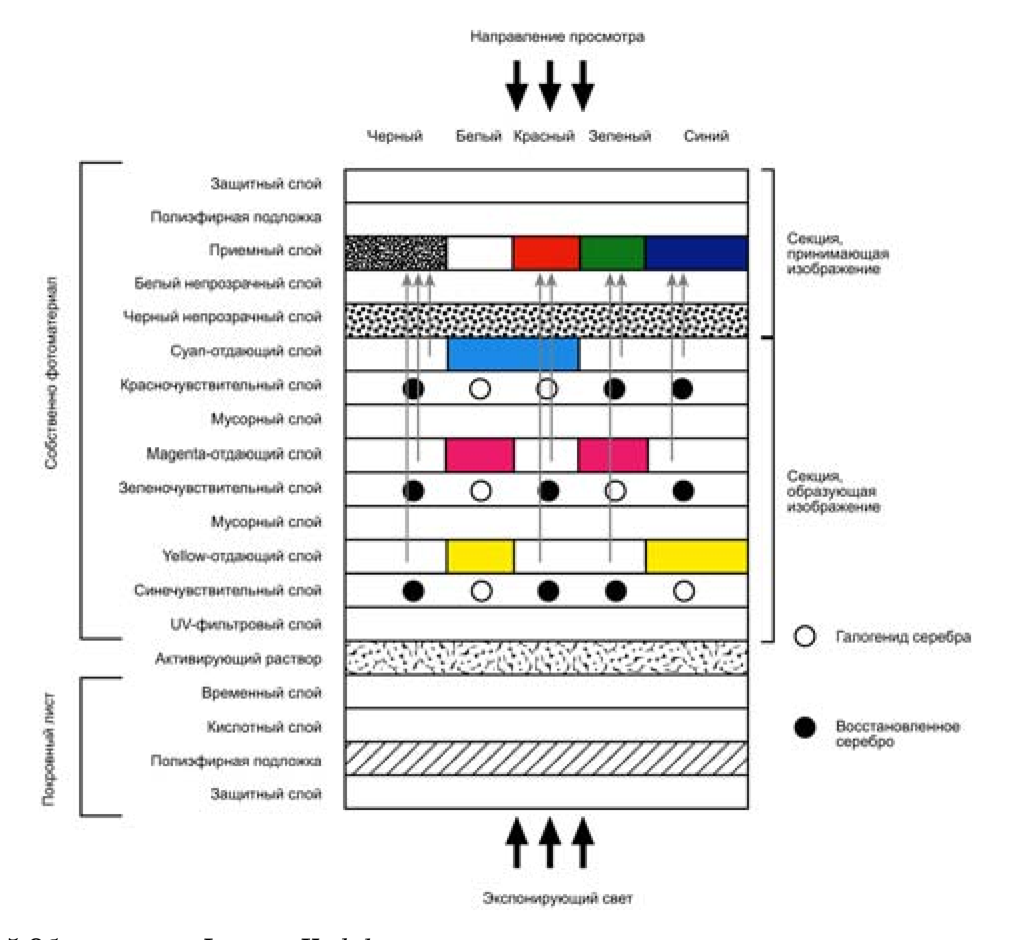


Рис. 17.5 Общая схема *Instant Kodak*-процесса.

17.10.4.3 Обработка фотоматериала

В результате протягивания экспонированного фотоматериала между прижимными валиками происходило раздавливание специальных микрокапсул, содержащих вязкую обрабатывающую смесь. Смесь эта проникала в воздушный зазор между слоем микрокапсул и кислотным слоем. Обрабатывающая смесь содержала уголь, защищавший светочувствительные слои от паразитного экспонирования через прозрачное покрытие (поэтому на данной стадии процесса фотоматериал можно было доставать из аппарата).

Обрабатывающий раствор содержал в себе и т.н. *электронпереносящее вещество* (*electron transfer agent — ETA*), которое в паре с т.н. *нуклирующим* агентом (веществом, образующим центр активации серебра) проявляло *неэкспонированные* зерна галоидного серебра, давая тем самым позитивное изображение. Однако в отличие от обычного проявителя ETA не расходовалось в результате проявления, а непрерывно регенерировало. Регенерация ETA достигалась за счет редукции его окисленной формы (образовавшейся вследствие проявления) в исходную неокисленную форму (реакция регенерации протекала под воздействием одного из веществ, высвобождающих красители). В итоге красители начинали диффундировать из слоев фотоматериала, создавая требуемое позитивное красочное изображение. Высвободившиеся красители двигались из собственных слоев, через непрозрачный и белый отражающий слои, к приемному слою, где протрава превращала их в неподвижные соединения. Слои, поглощавшие окисленное проявляющее вещество, не пускали окисленное ETA в красочные слои, принадлежащие двум другим светочувствительным слоям.

Отметим, что все слои фотоматериала системы «Instant Kodak» были достаточно тонкими, и результирующее изображение выглядело резким (при обычной дистанции просмотра).

С целью остановки процесса проявления и нейтрализации щелочного обрабатывающего раствора использовался кислотный слой, заключенный в покрытии фотоматериала. Последний не только в нужный момент останавливал проявление, но и стабилизировал финальное изображение. Также обрабатывающий раствор позволял покровному листу плотно сцепиться с финальным изображением.

Стоит отметить, что в системе «Instant Kodak» изображение хоть и начинало появляться на приемном слое в течение первой минуты процесса, но максимальных оптических плотностей оно достигало лишь через несколько минут, аналогично тому, как это происходило в системе *Polarcolor*.

17.10.5 Система Fuji Pictography

Система Fuji Pictography задействовала примерно те же технологии, что были описаны выше, и могла использоваться в качестве удобного способа получения принтерных отпечатков (см. раздел 33.7).

17.10.6 Прочие трансферные процессы

Особенностью всех систем, в которых готовые красители внедрены в слои фотоматериала, является то, что в период экспозиции некоторое количество света теряется за счет поглощения. Светопотери можно свести к минимуму, если использовать конструкционные схемы, показанные на рис. 17.4 и 17.5, в которых красители расположены *под* соответствующими светочувствительными слоями, но не смешаны с ними. В результате после прохода света через желтый, пурпурный и голубой красители не-

значительные потери возникают лишь за счет паразитных поглощений (у желтого красителя в средне- и длинноволновой частях видимого спектра; у пурпурного красителя — в длинноволновой).

Отметим, что аналогичный трансферный процесс можно разработать для систем, использующих традиционное цветное проявление. Безусловно, перенос красителей в этом случае возможен только тогда, когда красители эти высокоподвижны, а куплеры, из которых они образуются, — статичны, или, по крайней мере, малоподвижны (поскольку должны оставаться в эмульсионных слоях оригинального фотоматериала).

Одним из решений данной проблемы является добавка к химической структуре краскообразующих компонент (в точке сцепки с проявляющим веществом) крупной балластной группы: окисленное проявляющее вещество в момент реакции сочетания с компонентой заменяет собой балластную группу, образуя тем самым подвижный краситель из неподвижного куплера.

Реакцию такого типа (на примере yellow-образующей компоненты) можно представить уравнением:

Неподвижный куплер

Цветное проявляющее вещество

Водорастворимый краситель

Если величина «n» в C_nH_{n+1}-группе относительно велика ($n = 15$ и более), то молекула куплера окажется весьма крупной и малоподвижной; при этом молекула красителя окажется совсем небольшой, поскольку не будет иметь балласта, и благодаря своей сульфогруппе (SO_3H) вполне растворимой в водных средах. Следовательно, после проявления молекула красителя перейдет приемный лист, если последний находится с нею во влажном контакте. После переноса протрава приемного листа иммобилизирует краситель, образуя нерастворимое красочное изображение. Таким образом, схема обработки фотоматериала вновь оказывается довольно простой: проявление и перенос.

17.11 DIR-КУПЛЕРЫ

В разделе 17.4 было показано, что, добавив к краскообразующей компоненте хромофорную группу в точке сцепки с проявляющим веществом, можно организовать весьма удобный метод маскирования фотоматериала. Однако вместо хромофорной группы (или вместе с ней) можно использовать соединения, подавляющие процесс

проявления (т.н. вещества — *ингибиторы проявления*), что тоже реализует маскирование (а также ряд дополнительных полезных эффектов).

Краскообразующие компоненты, относящиеся к классу куплеров, выделяющих вещества — ингибиторы проявления (Development-Inhibitor-Releasing — DIR), создают локальные концентрации неких специфических соединений, угнетающих процесс проявления. Причем переход этих веществ из одного эмульсионного слоя в другой можно организовать так, что степень угнетения проявления в одном слое будет пропорциональна интенсивности проявления в другом. Например, DIR-magenta-образующая компонента может выделить вещество, селективно угнетающее выход желтого красителя, чем компенсировать паразитное поглощение magenta-красителем в коротковолновой («синей») части видимого спектра.[1]

DIR-куплеры можно использовать также с целью понижения зернистости и повышения резкости изображений: к примеру, коль скоро реакция сочетания идет вокруг зерен серебра, высвобождение ингибиторов позволяет уменьшить размер облаков красителей, что для достижения требуемых оптических плотностей влечет за собой необходимость проявления большего числа зерен на единицу площади. Следствием является меньшая зернистость изображения.

Применяя DIR-куплеры можно усилить и краевые эффекты, поскольку концентрация ингибитора падает у краев проявляемой области, повышая разность оптических плотностей между краем и телом интересующего элемента изображения, то есть — поднимая визуальную резкость.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Barr, C.R., Thirtle, J.R., and Vittum, P.W., Phot. Sci. Eng., 13, 74 and 214 (1969).

Beilfuss, H.R., Thomas, D.S., and Zuidema, J.W., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 75, 344 (1966).

Bergthaller, P., Imaging Science Journal, 50, 153, 187, 233 (2002).

British Journal of Photography, Brit. J. Phot., 109, 904 (1962).

British Journal of Photography, Brit. J. Phot., 119, 872 (1972).

Collins, R.B., Phot. J., 100, 173 (1960).

Crawley, G., Brit. J. Phot., 110, 76 (1963).

De Ramaix, M., Phot. Sci. Eng., 15, 262 (1971).

Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, Wiley, New York, p. 260 (1953).

Fritz, N.L., Proc. Am. Soc. Photogram., Workshop on Color Aerial Photography and Plant Sciences and Related Areas (March 1971).

Ganguin, K.O., and MacDonald, E., J. Phot. Sci., 14, 260 (1966).

Gledhill, R.J., and Julian, D.B., J. Opt. Soc. Amer., 53, 239 (1963).

Gehret, E.C., Brit. J. Phot., 111, 818 (1964).

Hanson, W.T., Phot. Sci. Eng., 20, 155 (1976).

Land, E.H., Brit. J. Phot., 119, 858 (1972), and Phot. Sci. Eng., 16, 247 (1972).

Meyer, A., J. Phot. Sci., 13, 90 (1965).

Meyer, A., Phot. Sci. Eng., 18, 530 (1974).

Pollak, F., J. Phot. Sci., 3, 112 (1955).

---

[1] Нетрудно догадаться, что с целью компенсации паразитных поглощений в цветных обращаемых материалах должны использоваться (и используются) куплеры, выделяющие вещества — *активаторы* проявления (DAR-куплеры — Development Activator Releasing). — *Прим. пер.*

Pollak, F., and Hepher, M., Penrose Annual, 50, 106 (1956).
Vittum, P.W., and Weissberger, A., J. Phot. Sci., 2, 81 (1954).

ЛИТЕРАТУРА

Bent, R.L., Brown, G.H., Glesmann, M.C., Harnish, D.P., Tremmel, C.G., and Weissberger, A., Phot. Sci. Eng., 8, 125 (1964).

Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, pp. 257–266, Wiley, New York (1953).

Glafkides, P., Photographic Chemistry (translated by K.M. Hornsby), 2, 593–615, Fountain Press, London (1960).

Hornsby, K.M., Basic Photographic Chemistry, Fountain Press, London (1956).

James, T.H., and Higgins, G.C., Fundamentals of Photographic Theory, 2nd Edn., pp. 119–122, Morgan and Morgan, New York (1960).

Mees, C.E.K., and James, T.H., The Theory of the Photographic Process, 4th Edn., pp. 335–372, Macmillan, New York (1977).

Neblette, C.B., Photography: Its Materials and Processes, 6th Edn., pp. 240–248, Van Nostrand, New York (1962).

Thirtle, J.R., and Zwick, D.M., in Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd Edn., 6, 617, Wiley, New York (1979).

Vittum, P.W., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 71, 937 (1962).

Vittum, P.W., and Weissberger, A., J. Phot. Sci., 6, 157 (1958).

18 СТРУКТУРА ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

18.1 ВВЕДЕНИЕ

При рассматривании неувеличенного цветного фотографического изображения, к примеру на слайде, который у нас в руках, визуальный интерес представляют лишь видимые элементы этого слайда. Однако при увеличении обнаруживается, что цветное фотографическое изображение, как и черно-белое серебряное, обладает гранулярной структурой.

18.2 УВЕЛИЧЕНИЕ

Возьмем в качестве примера все тот же цветной слайд (35 мм): как уже было сказано, когда мы держим его в руках и рассматриваем его с расстояния 250 мм, мы не распознаем его гранулярной структуры. Известно, что *разрешающая способность зрения* (*острота зрения*) составляет примерно 20 циклов на градус (цикл/град). Сие значит, что порог пространственного различения объектов равен примерно 1.5 дуговым минутам. По этой причине зрение не в состоянии распознавать детали, размер которых меньше, чем 5 цикл/мм, и диаметр наименьшего различимого объекта составляет примерно 1/10 мм.

Когда слайд проектируется посредством объектива с фокусным расстоянием 100 мм и на удалении от экрана равном пятикратной его ширине, увеличение составляет 250/100, то есть 2.5 крат — если рассматривать экран с позиции проектора, и 5 крат — если наблюдатель оказывается на середине расстояния между проектором и экраном. В первом случае острота зрения «увеличивается» до 12.5 цикл/мм, во втором — до 25 цикл/мм (см. табл. 18.1). При таких кратностях гранулярная структура изображения по-прежнему не воспринимается зрением, однако при дальнейших увеличениях постепенно начинает становиться различимой некая структурность этого изображения.

Когда изображение на экране рассматривается с расстояния в десять раз меньшего, чем расстояние между проектором и экраном, то есть при увеличении в 25 раз, те области изображения, что выглядели равномерно окрашенными, начинают восприниматься явно гранулярными, намного менее резкими и с меньшей деталировкой: действительно, благодаря 25-кратному увеличению острота зрения «достигает» 125 цикл/мм, из-за чего становятся различимыми элементы слайда порядка 4 мкм (μm) в диаметре.

Если воспользоваться стандартным оптическим микроскопом, то увеличение вырастет еще в 10 раз, то есть до 250 крат, благодаря чему острота зрения «достигнет» 1250 цикл/мм (и станут различимыми объекты размером 0.4 μm в диаметре). Мы обна-



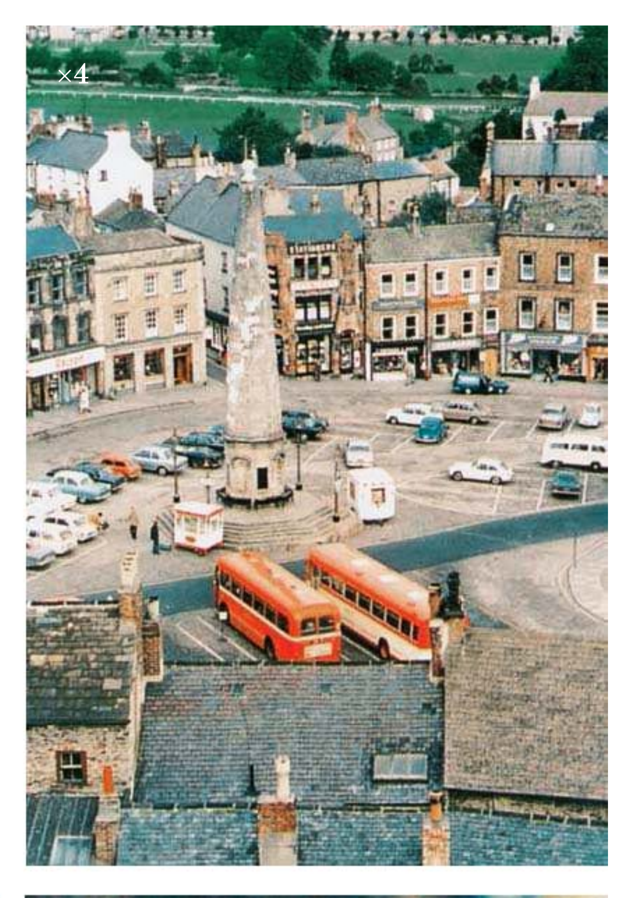
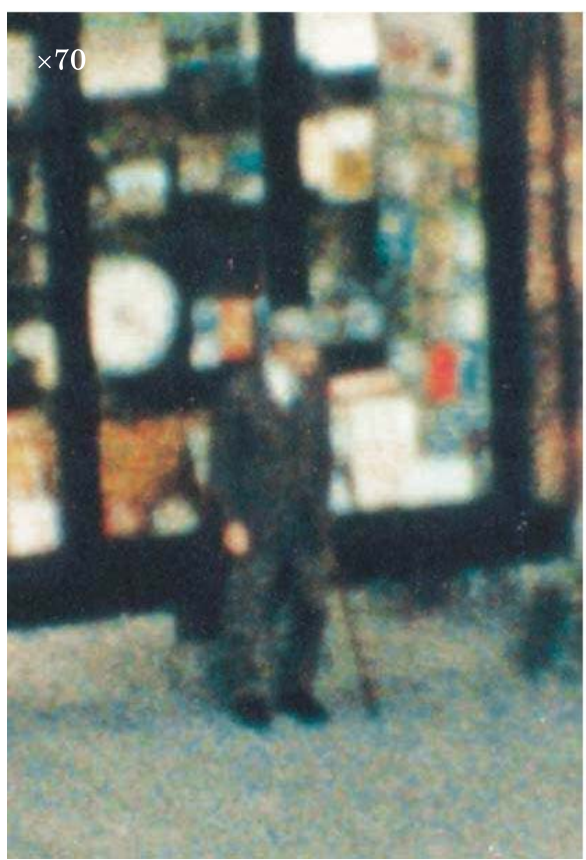
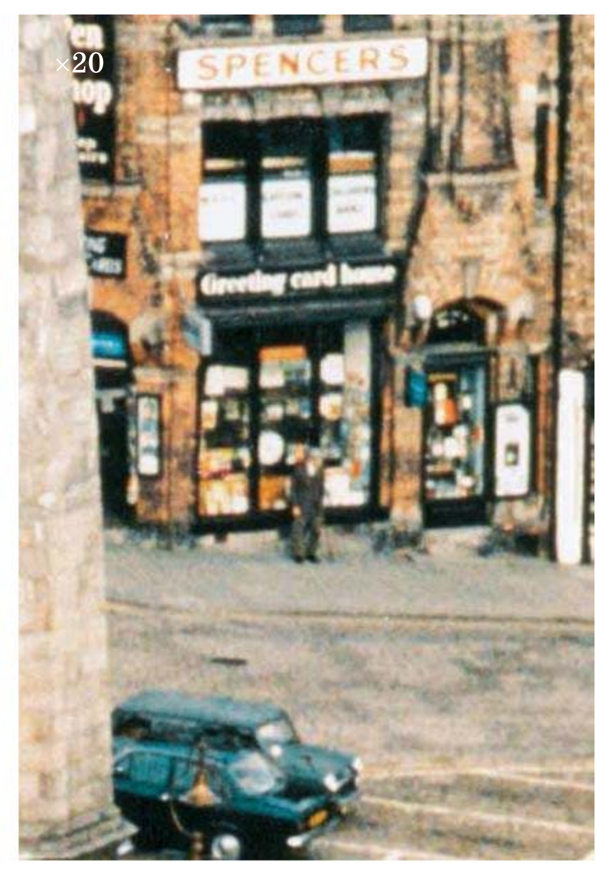


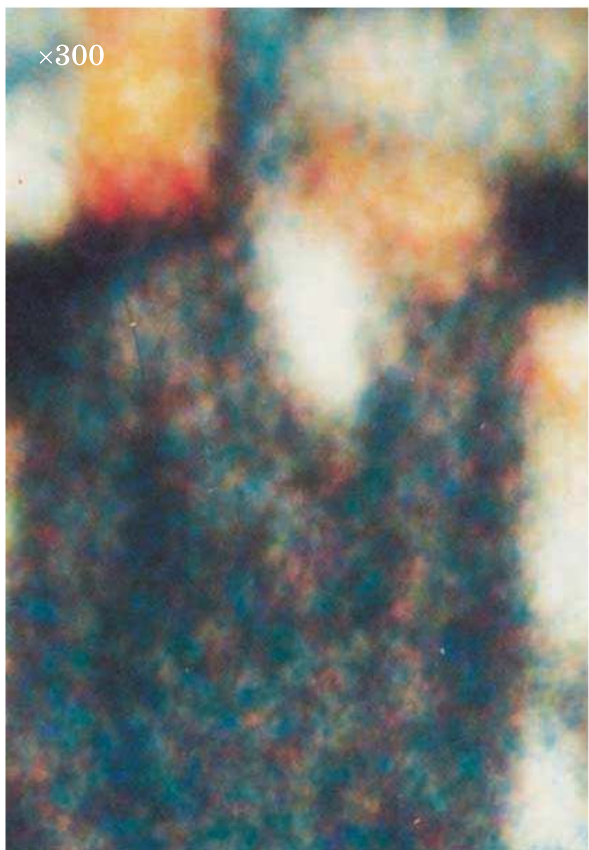
Рис. 18.1 Репродукции слайда исходного размера 24×16 мм (слева вверху), выполненного на пленке Kodachrome, с увеличением фрагментов в 4, 6, 20, 70, 100, 300 и 1000 раз. По мере роста увеличения гранулярная структура изображения становится все более заметной (см. разделы 18.2 и 18.7), а визуальная резкость падает (см. разделы 18.9 и 18.15).
Микрофотографии любезно предоставлены Г.К. Фарнеллом и Фрэнком Джаддом (Kodak Research Laboratories, Harrow).






×6
STATIONERS


×20
SPENCERS
Greeting card house


×300


×1000

ТАБЛИЦА 18.1 «Острота зрения» при различных просмотровых ситуациях

Просмотровая ситуация	Увеличение (крат)	«Острота зрения»				Визуальное различение гранулярных структур
		Высококонтрастные объекты		Низкоконтрастные объекты		
		цикл/мм	μm	цикл/мм	μm	
Невооруженный глаз	1	5	100	1	500	Нет
Проекционное увеличение со 100 мм объективом						
С позиции проектора	2.5	12.5	40	2.5	200	Нет
1/2 расстояния «проектор-экран»	5	25	20	5	100	Слегка или нет
1/10 расстояния «проектор-экран»	25	125	4	25	20	Кляксообразные пятна окрашенных зерен
Микроскоп	250	1250	0.4	250	2	Отдельные окрашенные зерна
Электронный микроскоп	2500	12500	0.04	2500	0.2	Глобулы красителя (если есть)

ружим при этом, что изображение состоит из мелких разноцветных каплеобразных пятен.

Увеличение до 2500 крат, реализуемое с помощью электронного микроскопа и «поднимающее» остроту зрения до 12500 цикл/мм (различимы объекты размером 0.04 μm), показывает, что сами пятна состоят из облаков сверхмелких капель (глобул) красителя (см. рис. 18.1).

Итак, причина гранулярности большинства фотографических изображений в том, что изображения эти получены из галогенсеребряных эмульсий, которые сами состоят из отдельных кристаллов, или, как еще говорят, — *зерен*. Средний размер этих зерен составляет от 0.5 μm (низкочувствительные эмульсии фотобумаг и копировальных пленок) до 1.5 μm в диаметре (высокочувствительные эмульсии рентгеновских фотоматериалов). Однако даже в рамках одной фотографической эмульсии размер зерен вариабелен.

Поскольку крупные зерна за один и тот же промежуток времени абсорбируют больше фотонов, чем мелкие, изменчивость размера зерен позволяет добиться того, что у фотоматериала появляется некий коридор чувствительностей и, следовательно, возможность нормально экспонироваться в достаточно широком диапазоне эксповеличин. В этом случае мы говорим, что фотоматериал обладает высокой *фотографической широтой*.

Минимальный размер зерна в эмульсии обычных «полевых» фотопленок (т.е. используемых для регистрации реальных сцен) составляет порядка 1 μm в диаметре, и, следовательно, 25-кратное проекционное увеличение слайда, «ограничивающее» остроту зрения объектами размером 4 μm, не позволяет разглядеть в проявленном фотоматериале зерна восстановленного серебра. Почему же тогда при 25-кратном увеличении изображение все-таки выглядит зернистым?

Дело в том, что зерна в черно-белом фотоматериале расположены более или менее

хаотично и не образуют регулярных структур, но лишь некие группы, состоящие из конгломератов кристаллов серебра и промежутков между этими конгломератами. Суммарный размер групп оказывается много больше, чем 4 μm, и порой достигает 40 μm, вследствие чего изображение и выглядит зернистым.

В изображениях красочных зерен восстановленного серебра и зерен галогенида серебра, как правило, нет (поскольку и те и другие удаляются из слоев фотоматериала при его обработке), но цветное изображение состоит при этом из кляксообразных микропятен голубого, пурпурного и желтого красителей, появившихся в результате процесса цветного проявления. Если в производстве какого-либо материала краскообразующие компоненты были равномерно диспергированы в эмульсионных слоях или же диффундировали в эти слои из цветных проявляющих растворов, то облака красителей, образовавшиеся вокруг зерен серебра, будут иметь сугубо молекулярную структуру. Однако если краскообразующие компоненты диспергированы в эмульсионных слоях в виде микрокапель, то субструктура образованных ими красителей будет, как говорят, *глобулярной*.

Размер облаков красителей, которые мы вправе назвать *цветовыми зернами*, обычно равен размеру зерен галоидного серебра (или чуть превышает его). Так, к примеру, некоторые облака могут иметь размер порядка 1 μm в диаметре (хотя порой и сливаются друг с другом в массивные «тучи»), однако размер отдельных масляных микрокапель (если таковые встречаются) обычно составляет порядка 0.1 — 0.2 μm. Поэтому при увеличении изображения в 250 раз («повышение» остроты зрения до 0.4 μm) становятся различимыми красочные зерна, а при увеличении в 2500 раз («повышение» остроты зрения до 0.04 μm) видимыми становятся масляные микрокапли (глобулы).

Перечисленные варианты сведены в таблицу 18.1, в которой, отметим, границы остроты зрения даны не только по высококонтрастным деталям, но также и по низкоконтрастным, по которым разрешающая способность зрения ниже.

18.2.1 Увеличение при кинопоказе

В цветном кинематографе, в отличие от обычной цветной фотографии, имеют место бóльшие увеличения, и поэтому гранулярная структура изображений ощутимо заметнее. Коль скоро распределение зерен в слоях кинопленки хаотично, то понятно, что по каждой области сцены у нескольких последовательных кадров это распределение будет различным. Результатом явится возникновение такого визуального феномена, как «роение» изображения («кипение») — скоростное хаотичное движение точек, сходное с полетом роя пчел или кипением воды. Коль скоро чувствительность зрительной системы к движущимся стимулам выше, чем к стимулам статичным, зернистость кинопленок заметнее, чем зернистость статичного фотоизображения при той же степени увеличения.

В таблице 18.2 (в контексте разговора об увеличении киноизображений) даны параметры типичных просмотровых условий, а именно: фокусное расстояние проекционного объектива, расстояние от точки наблюдения до экрана (в долях отрезка «проектор — экран»), степень увеличения (Harpe, 1971).

18.2.1.1 Просмотровые расстояния

Считается, что оптимальный диапазон просмотровых расстояний в кинозале лежит в пределах от 0.87 ширины экрана (ближайшие к экрану кресла), до шестикратной ширины экрана (галерка) (Wheeler, 1969). Коль скоро типичная ширина изобра-

ТАБЛИЦА 18.2 Типичные кратности увеличения изображений

Пленка	35 мм	16 мм	8 мм и Super 8
Типичное фокусное расстояние проекционного объектива	100 мм	50 мм	25 мм
Увеличение изображения с разных просмотровых позиций			
Ширина изображения (проекционная апертура)	21 мм	10 мм	4.4 или 5.3 мм
От проектора	2.5 крат	5 крат	10 крат
4/5 от экрана (типичный телевизионный просмотр)	3 крат	6 крат	12 крат
3/4 от экрана (усредненное место в кинотеатре)	4	8	17
Середина расстояния «проектор-экран»	5	10	20
1/6 от экрана (центральные сиденья в первом ряду)	15	30	60

жения на пленке составляет 1/5 от фокусного расстояния проекционного объектива (см. табл. 18.2), то, как мы видим по рис. 18.2, ближние кресла окажутся примерно в шесть раз ближе к экрану (5/0.87), чем проектор (если не учитывать при этом т.н. коэффициент анаморфирования проекционного объектива).

Из табл. 18.2 ясно, что ясно, что в первом ряду изображение окажется максимально увеличенным. Три четверти расстояния от экрана до проектора примерно равны тройной ширине экрана, что полагают типичной (средней) просмотровой ситуацией. Более чем пятикратное увеличение изображения, как правило, обнаруживает гранулярную структуру обычных 35-мм пленок, и из таблицы 18.2 мы видим, что зернистость этих пленок станет заметной лишь тем зрителям, что находятся ближе к экрану, чем к проектору. Однако в отношении 16-мм фильмов зернистость ощущается уже в срединном положении наблюдателя, а у 8-мм пленок обоих типов — во всех положениях.

Отметим, что приведенные данные получены на основе большого практического опыта, хотя, конечно, нельзя забывать от том, что у высокочувствительных пленок зернистость выше, чем у низкочувствительных (поскольку, как правило, именно за счет крупного зерна достигают высокой чувствительности фотоматериалов). Отметим также, что ощущение зернистости может усугубиться в результате фильмокопирования, особенно при использовании промежуточных кинопленок.

18.2.2 Увеличение при телепоказе

При телевизионном кинопоказе коэффициент увеличения изображения примерно тот же, что и в кинозале: типичное расстояние телевизионного просмотра обычно полагают равным пяти-шестикратной высоте изображения, поэтому коэффициент пропорциональности 4:3 по телеизображениям — это эквивалент четырехкратной ширины изображения при кинопоказе (или, соответственно, 4/5 расстояния «проектор — экран»).

Итак, из табл. 18.2 мы видим, что при показе 35-мм фильмов по телевидению (увеличение в 3 раза) зерно скорее всего не будет заметным, но вполне вероятно, что оно проявит себя при демонстрации 8-мм лент (увеличение в 12 раз). При телепоказе

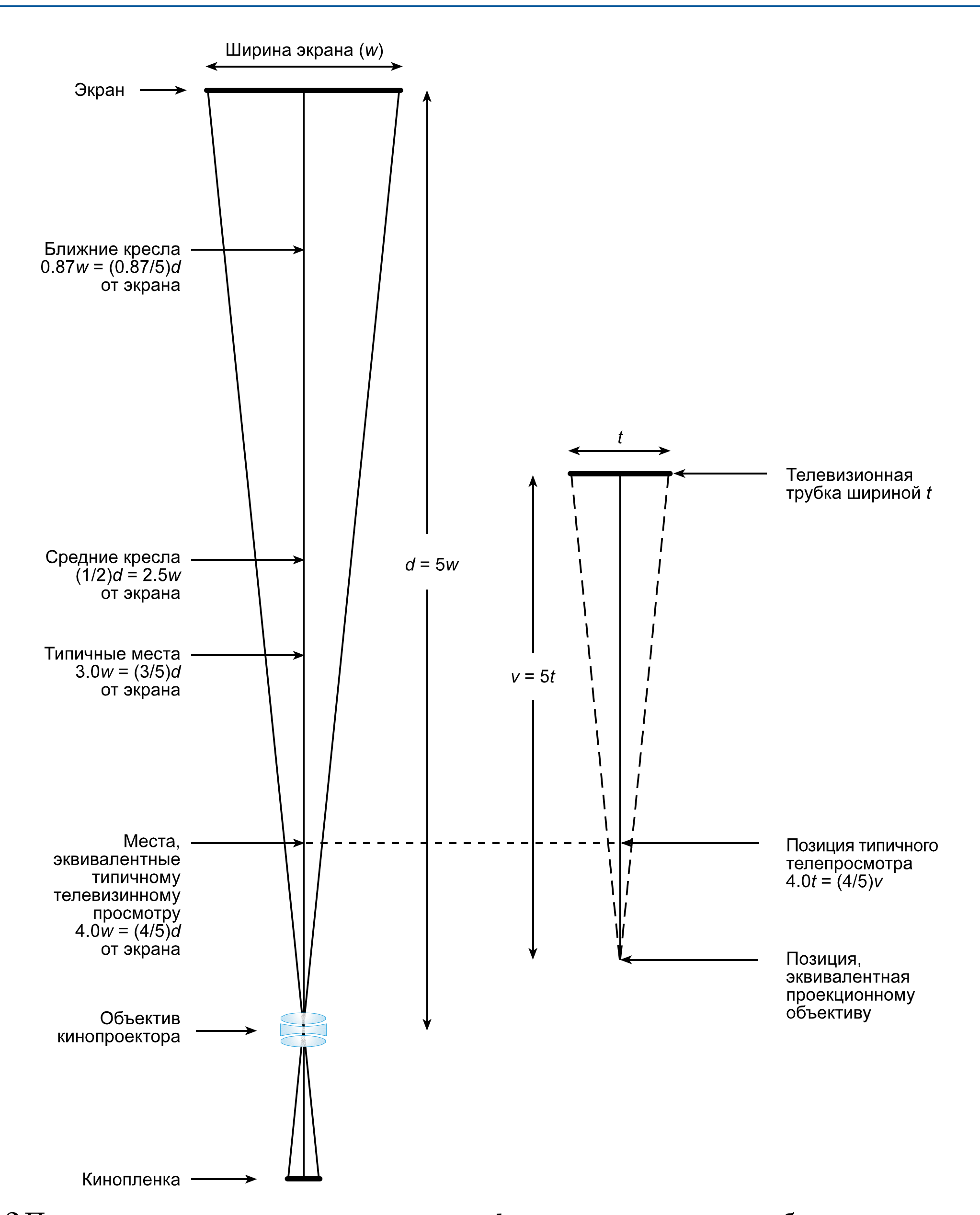


Рис. 18.2 При проекционном показе отношение фокусного расстояния объектива кинопроектора к ширине кинопленки как правило составляет 5:1, поэтому типичное расстояние от проектора до экрана (d) оказывается равным пятикратной ширине экрана (w). При телевизионном просмотре v-расстояние равно $5t$, где t — эффективная ширина телевизионной трубки.

16-мм кинофильмов (увеличение в 6 раз) — ситуация пограничная, то есть иногда зерно заметно, иногда — нет. Все сказанное подтверждается практикой.

18.3 ЗЕРНИСТОСТЬ И ГРАНУЛЯРНОСТЬ

Продолжая разговор о гранулярной структуре фотографического изображения в контексте восприятия этой гранулярности наблюдателем, приходим к сугубо перцепционному толкованию термина *зернистость*. Физический параметр изображения, кото-

рый в конечном счете ведет к возникновению ощущения зернистости, носит название *гранулярности*. Таким образом, понятие «зернистость» — понятие перцепционное, субъективное, тогда как «гранулярность» — сугубо объективное, физическое понятие.

Гранулярность того или иного фрагмента фотоматериала при данной степени увеличения изображения и данном характере освещения — инвариантна, однако зернистость при этом весьма зависима от условий просмотра изображения, к примеру: если интересующий нас фрагмент изображения окажется окруженным областью гораздо большей фотометрической яркости — ощущение зернистости уменьшится и может даже исчезнуть, однако когда тот же фрагмент оказывается окруженным областью много меньшей яркости — зернистость может резко вырасти.

Понятно, что возникновение ощущения зернистости при восприятии изображения крайне нежелательно, поскольку ведет к появлению на равномерных участках этого изображения визуальных псевдотекстур (или «роения» при просмотре кинофильмов), а также к дроблению его мелких деталей.

18.4 ГРАНУЛЯРНОСТЬ СЕРЕБРЯНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Черно-белые фотографические эмульсии обладают гранулярной структурой благодаря тому, что состоят из дискретных кристаллов галоидного серебра (зерен галоидного серебра). В процессе проявления постепенно образуются тонкие нити восстановленного серебра, расходящиеся от зерен серебра галоидного, активированного светом (точнее от точек активации, образующих скрытое изображение). Процесс проявления идет до тех пор, пока нити эти не сформируют рыхлую массу. Последняя оказалась бы много крупнее оригинальных кристаллов, если бы не присутствие желатина, ограничивающего размеры зерен проявленного серебра исходными размерами микрокристаллов серебра галоидного: кристаллы «замурованы» в желатин при поливе эмульсии.

Отдельные серебряные нити столь тонки, что видны лишь в электронный микроскоп, и поэтому работать как самостоятельная оптическая единица начинает лишь конгломерат из множества нитей. Поскольку показатель преломления зерен восстановленного серебра сильно отличен от такового у желатиновой среды, зерна эти не только поглощают свет, но активно рассеивают его.

Сказанное подтверждается тем фактом, что т.н. *коэффициент Калье* (отношение зеркальной оптической плотности к диффузной — см. раздел 14.4) у серебряных изображений может превысить 2. Однако у цветных фотографических изображений он редко превышает 1.1, поскольку показатели преломления частичек красителя и желатина сухой фотопленки обычно равны друг другу.

Таким образом, гранулярность черно-белых серебряных изображений меняется в зависимости от направлений освещения и измерения, и, следовательно, та или иная измерительная система должна имитировать практические условия просмотра. В контексте красочных изображений последнее менее значимо, однако все же желательно, поскольку поверхность цветной пленки иногда оказывается шероховатой (см. раздел 18.16).

18.4 Теория Сельвина

18.4.1 Расчет показателя гранулярности

Гранулярность серебряных изображений как феномен активно изучалась как теоретически и практически (Selwyn, 1939; Selwyn, 1943; Higgins и Stultz 1959).

На практике гранулярность фотоматериала можно определить путем измерения интересующего образца через апертуру достаточно малого размера (как правило, используется микроскоп): образец (или апертура) движется по окружности, диаметр которой много больше диаметра апертуры (см. рис. 18.3 [b]); колебание оптической плотности, возникающее по мере движения, и является мерой гранулярности.

Экспериментально показано, что измерение гранулярности фотоматериалов описанным выше способом четко коррелирует с величиной ощущения зернистости, поскольку при тех или иных условиях просмотра (предполагающих неизменность фотометрических яркостей как самого образца, так и элементов его окружения) измерения нескольких образцов разной гранулярности выстраиваются во вполне достоверный ряд по параметру визуальной зернистости.

Согласно Сельвину, гранулярность должна измеряться как среднеквадратичный корень колебаний оптической плотности, что фактически равносильно измерению величины стандартной девиации колебаний этого показателя (σ_D).

18.4.2 Гранулометры

В т.н. *грануло́метрах* (приборах, предназначенных для измерения гранулярности) сигнал от света, прошедшего от измеряемого образца в апертуру, обычно подвергается логарифмическому усилению, дабы сигнал этот стал пропорционален оптической плотности (после чего и производится электрическое измерение стандартного отклонения) (см. рис. 18.3).

Сельвиновская теория гласит, что гранулярность, измеренная описанным способом, обратно пропорциональна корню квадратному из площади апертуры (a):

$$\sigma_D = K / \sqrt{2a}$$

где «K» — *т.н. сельвиновская постоянная*, свидетельствующая о том, что для любого изображения базовое колебание его оптической плотности зависит от площади считывающей апертуры. В отношении серебряных изображений сей тезис был подтвержден экспериментально.

Отметим, что если площадь считывающей апертуры относительно велика, то внутри последней возникает определенный дрейф оптической плотности образца, в частности, пыль и грязь становятся причиной завышения величины гранулярности при измерении.

Считается, что наиболее достоверными являются результаты, полученные при измерении гранулярности через апертуру диаметром 24 μm (не бо́льше и не меньше) (Mees и James, 1966). Коль скоро корень квадратный из площади апертуры прямо пропорционален линейному размеру последней, то для черно-белых серебряных изображений величина σ_D будет обратно пропорциональна величине линейного увеличения образца.

Широко распространенной формой представления результатов измерения грану-

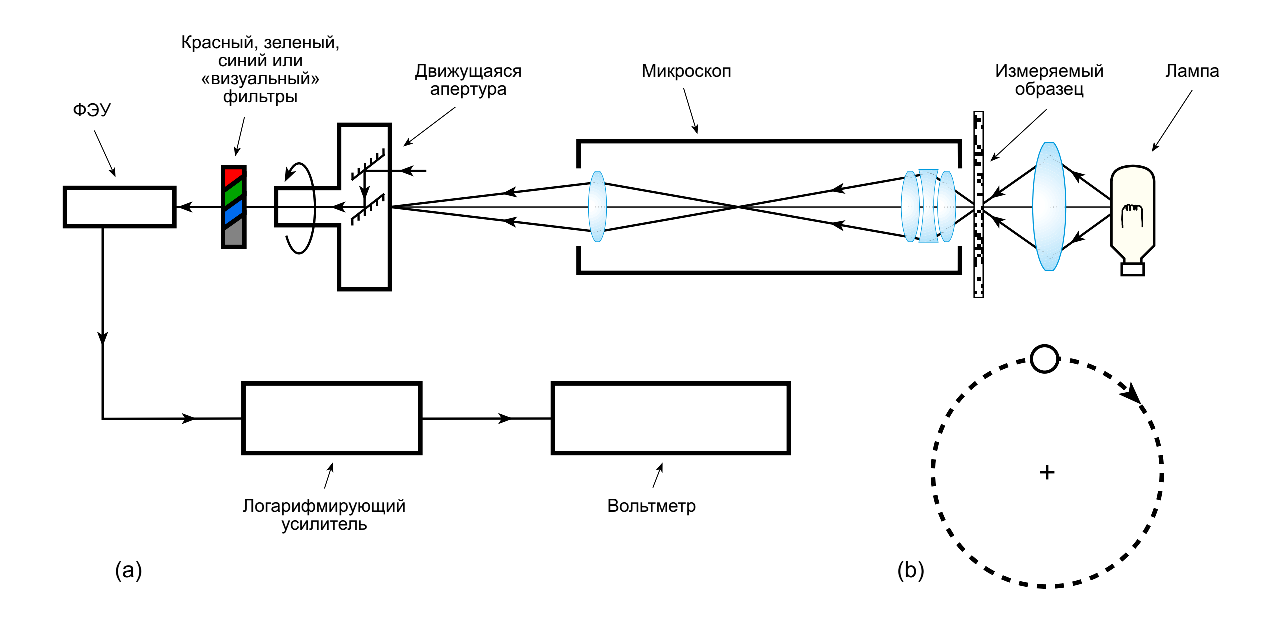


Рис. 18.3 Принципиальная схема гранулометра. (a) — общая конструкция: увеличенное изображение образца фокусируется микроскопом на вращающемся экране с эксцентрично расположенной апертурой. Среднеквадратичный вольтметр измеряет колебание электрического сигнала, которое оказывается пропорциональным логарифму интенсивности света, прошедшего через апертуру; (b) — траектория апертуры (Rotthaler, 1974).

лярности является умножение величины стандартной девиации колебаний оптической плотности (σ_D) на 1000:

$$\text{Среднеквадратичная гранулярность} = 1000 \cdot \sigma_D$$

При этом предполагается, что σ_D измерена круглой считывающей апертурой с диаметром в 48 μm, а оптическая плотность образца, полученная в режиме измерения диффузной оптической плотности, равна 1.0. К примеру: если среднеквадратичная гранулярность равна 10 (типичное значение у черно-белых негативных пленок), то $\sigma_D = 0.01$; сие означает, что 30% колебаний оптической плотности (при условии их нормального статистического распределения) превысят ±0.01; 5% превысят ±0.02 и 0.3% превысят ±0.03.

Может показаться, что использование апертуры диаметром 48 μm соответствует увеличению изображения в 2.5 раза, однако было экспериментально показано, что на самом деле апертура данного диаметра представляет двенадцатикратное увеличение (Stultz и Zweig, 1959). Такая разница образуется потому, что картина наилучшей остроты зрения, данная в таблице 18.1, относится к высококонтрастным деталям изображения, в то время как детали с низким контрастом находятся у порога своей различимости зрением. Следовательно, для измерений следует выбирать наихудшие варианты остроты зрения (т.е. по низкоконтрастным деталям), и в этих случаях увеличение при апертуре диаметром 48 μm окажется как раз двенадцатикратным. Как видно по табл. 18.2, двенадцатикратное увеличение соответствует просмотру 16-мм кинофильма с середины расстояния между проектором и экраном.

18.4.3 Гранулярность и оптическая плотность

Сельвиновская теория утверждает также, что гранулярность прямо пропорциональна корню квадратному из оптической плотности. Эта зависимость, безусловно, имеет место, когда речь идет о черно-белых серебряных изображениях, где размер зерна относительно постоянен (и при условии, что все активированные светом зерна галогенида серебра полностью восстановлены проявителем). Однако при многих вариантах сочетания эмульсия/проявитель нестабильность размеров зерна, неполное проявление некоторых зерен (особенно в участках высоких оптических плотностей), а также ряд других факторов несколько тормозят рост гранулярности в сравнении с ростом оптической плотности (против того, на что указывает корнеквадратная зависимость).

Когда оценивается гранулярность негативных материалов, следует помнить, что эти материалы чаще всего предназначаются к печати на высококонтрастных копировальных пленках или высококонтрастных фотобумагах. При этом гранулярность отпечатков зависит от разрешающей способности объектива принтера (фотоувеличителя), гранулярности негатива, а также от величины гранулярности и коэффициента контрастности позитивного материала. Таким образом, некоторая нерезкость копировальной оптики немного снижает эффект гранулярности негатива, однако высокий коэффициент контрастности позитивного фотоматериала повышает его.

18.5 ПРОСТРАНСТВЕННО-СПЕКТРАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ШУМА

Приняв во внимание такой показатель, как *пространственно-спектральная мощность шума*, мы сможем лучше разобраться в природе колебаний оптической плотности.

Выходной сигнал микроденситометра, встроенного в гранулометр, можно проанализировать, пропустив этот сигнал через узкополосные частотные фильтры, и измерив затем разброс значений на элементах разных пространственных частот (Doerner, 1962; Wall и Steel, 1964; De Belder и De Kerf, 1967; Verbrugghe, De Belder и Langner, 1967; Dainty и Shaw, 1976). Поскольку частоты электрических сигналов окажутся согласованными с пространственными частотами изображения на пленке, мы сможем определить величину колебаний оптической плотности на разных пространственных частотах.

Примеры таких измерений, именуемых измерениями *спектров Винера* (*винеровских спектров*) или измерениями *спектральной мощности шума*, показаны на рис. 18.4, где величина «P» дана как функция от «f» («f», в свою очередь, — это пространственная частота в циклах/мм):

$$P = \sigma_{\mathrm{Df}}^2$$

где σ_{Df} — стандартная девиация колебаний оптической плотности в узкой полосе пространственных частот (с центром этой полосы в f-позиции) по данной выбранной площади считывающей апертуры микроденситометра.

Стоит сказать, что коль скоро общая величина колебания оптической плотности (σ_{D}) по всем частотам равна корню квадратному из A:

$$\sigma_{\mathrm{D}} = \sqrt{A}$$

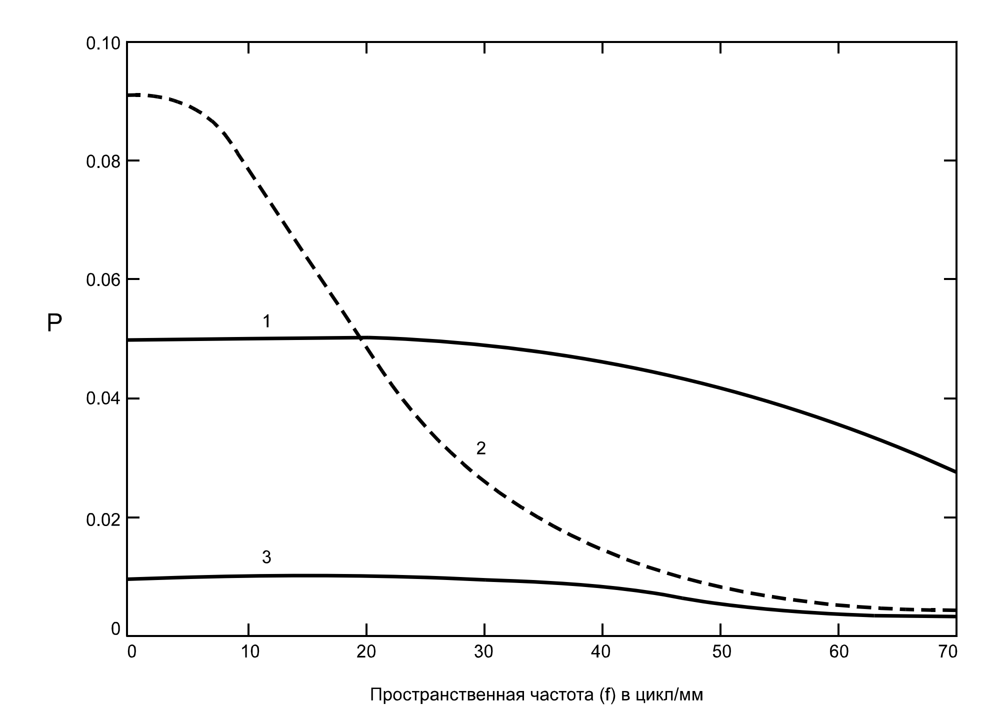


Рис. 18.4 1 — кривая пространственно-спектральной мощности шума негативной кинопленки; 3 — то же позитивной дубль-пленки; 2 (пунктирная линия) — кривая пространственно-спектральной мощности шума изображения, выполненного на позитивной дубль-пленке (3) с негативной пленки (1); по оси ординат (P) отложено среднеквадратичное отклонение колебаний оптической плотности (σ_D) по узким полосам пространственных частот с центрами, приходящимися на f.

где «A» — это площадь фигуры под кривой спектральной мощности шума, то обычно строят график квадрата σ_{Df}. Таким образом, при данной площади считывающей апертуры среднеквадратичная гранулярность будет прямо пропорциональна корню квадратному из площади фигуры под кривой спектральной мощности шума (Rotthaler, 1974).

На рис. 18.4 кривая «1» демонстрирует спектральную мощность шума негативной пленки, а кривая «3» — то же, но для отпечатка, выполненного с этой пленки. Мы видим, что на высоких частотах обе кривые плавно опускаются, что вызвано конечностью просвета апертуры гранулометра. Без этого фактора обе кривые в обычном диапазоне частот наверняка оказались бы совершенно горизонтальными (что часто называют «белым шумом»). Поскольку кривая «1» целиком лежит над кривой «3», становится ясно, что на всех пространственных частотах, захватываемых считывающей апертурой, колебания оптической плотности негативной пленки выше, чем у пленки копировальной.

Диапазон частот, в котором «P» плавно понижается до нуля, также зависит от размера считывающей апертуры: чем меньше апертура, тем бóльшую частоту она держит. Следовательно, если мы хотим, чтобы корень квадратный из площади фигуры под кривой спектральной мощности шума коррелировал с величиной ощущения зернистости, необходимо выбирать площадь считывающей апертуры так, чтобы потеря высокочастотного отклика возникала примерно на тех же пространственных частотах, что и у человеческого зрения (с соответствующей поправкой на степень увеличения изображения).

По рис. 18.16 хорошо видно, что зрение снижает отклик также и на низких про-

странственных частотах, для учета чего желательно наличие низкочастотного фильтра выходного сигнала гранулометра. Либо же: обходясь без низкочастотного фильтра, но используя при этом сверхмелкую считывающую апертуру, можно получить максимальные значения спектральной мощности шума.

Чтобы соотнести полученные пространственные спектры с ощущением зернистости, перед взятием интеграла площади под кривой необходимо — путем соответствующего взвешивания P-значений на различных частотах (используя при этом квадрат функции, подобной той, что показана на рис. 18.16) — учесть особенности зрительного восприятия.

Пунктирная кривая на рис. 18.4 — это кривая спектральной мощности шума, которая окажется у копии, выполненной с помощью пленок, имеющих кривые спектральной мощности шума 1 и 3.

Если процесс печати идеально «резкий», то есть на этапе печати не происходит никаких потерь оптической информации, и если дубль-пленка имеет коэффициент контрастности, равный 1.0, то P-значение копии явится простой суммой P-значений обеих пленок по каждой из частот. По рис. 18.4 видно, что на низких частотах P-значение копии больше, чем сумма отдельных значений двух пленок: так получилось потому, что коэффициент контрастности дубль-пленки был больше 1.0, и в результате вклад колебаний оптической плотности негатива в общее значение стал расти.

Понятно также, что на высоких частотах P-значение копии приближается к таковому у одной лишь дубль-пленки: сие есть следствие недостатка резкости оптики копировального аппарата, а также дубль-пленки (что ведет к сглаживанию графика колебаний оптической плотности негатива).

Следует сказать, что данный эффект описывается уравнением Дернера (Doerner, 1962):

$$P_{\text{T}} = P_3 + P_1 \gamma_3^2 M_2^2 M_3^2$$

где P_{T} — это P-величина копии, P_3 — P-величина дубль-пленки, P_1 — P-величина негатива, γ_3 — коэффициент контрастности дубль-пленки, M_2 — М-коэффициент оптики копировального аппарата (см. разделы 18.12 и 18.13) и M_3 — М-коэффициент дубль-пленки.

M-коэффициенты — это т.н. *частотно-контрастные функции*, обычно равные 1.0 на низких пространственных частотах и плавно падающие до нуля по мере роста этих частот. Следовательно, с помощью М-коэффициентов можно учесть тот факт, что благодаря особенностям оптики копировального аппарата и свойствам дубль-пленки колебания оптической плотности негатива прогрессивно сглаживаются по мере роста пространственных частот.

Когда величину P_{T} нужно согласовать с визуальными эффектами, возникающими из-за колебаний оптической плотности (и в ситуации, когда диаметр апертуры не был соответствующим образом уменьшен, и/или не был применен специальный низкочастотный фильтр), следует умножить величину P_{T} на W_{E}^2, где W_{E} — это некая взвешивающая функция зрения, то есть необходимая поправка на ту или иную степень увеличения изображения. Если площадь под кривой $P_{\text{T}} W_{\text{E}}^2$ обозначить как A_{E}, то зрительно-взвешенные колебания оптической плотности «σ_{DE}» будут описываться уравнением:

$$\sigma_{\text{DE}} = \sqrt{A_{\text{E}}}$$

У черно-белых серебряных изображений величина σ_{DE} прямо пропорциональна линейному увеличению изображения (m), однако у изображений красочных эта зависимость несколько иная.

Коль скоро гранулярность копии пропорциональна $\sqrt{A}$ или $\sqrt{A_E}$, то, следовательно, она будет расти по мере роста коэффициента контрастности копировального материала (γ_3). Коэффициент контрастности копировальных материалов прогрессивно падает по мере роста оптической плотности, поэтому и гранулярность копии по мере роста оптических плотностей тоже падает.

18.6 ЗЕРНИСТОСТЬ ПОЗИТИВНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ощущение зернистости при просмотре позитивов зависит не только от величины гранулярности позитивного фотоматериала, но также и от оптической плотности интересующего участка изображения: при данной гранулярности позитива по мере роста оптической плотности ощущение зернистости падает благодаря меньшей чувствительности зрения в глубоких тенях *изображений* (Lythgoe, 1932)[1]. Таким образом, гранулярность отпечатка зависит как от гранулярности негатива, так и от гранулярности позитивного материала. Гранулярность отпечатка падает по мере снижения резкости печатного процесса, но растет по мере роста коэффициента контрастности позитивного материала (и, следовательно, по мере роста оптических плотностей элементов отпечатка).

Вместе с тем при данной гранулярности отпечатка ощущение зернистости падает по мере роста оптических плотностей элементов изображения. Вследствие сих конфликтующих эффектов в черно-белых серебряных негативно-позитивных системах, конечным продуктом которых являются изображения на отражающих носителях, зернистость последних обычно достигает максимума при величине оптической плотности отпечатка порядка 0.6 (что, как правило, соответствует оптической плотности негатива 0.8). По упомянутой причине измерение гранулярности серебряных негативных изображений чаще всего проводится именно на уровне оптических плотностей в районе 0.6.

18.7 ГРАНУЛЯРНОСТЬ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Коль скоро цветное изображение — это чаще всего производное изображения черно-белого (серебряного), то мы ожидаем, что характер гранулярности цветного фотоматериала окажется сходным с характером гранулярности материала черно-белого. Действительно, характеры эти достаточно близки друг другу, но в то же время имеют ряд весьма серьезных отличий.

Первое отличие. Отдельные зерна восстановленного серебра черно-белых изображений непрозрачны и рассеивают свет примерно в той же степени, что и поглощают его. Облака красителей цветного изображения частично прозрачны, а светорассеяние ими стремится к нулю.

Второе отличие. Форма облаков красителей в слоях полностью обработанного и высушенного фотоматериала очень далека от шарообразной. И хотя в процессе образова-

---

[1] Но не сцен, при восприятии которых вступают в силу эффекты локальной адаптации зрения. — *Прим. пер.*

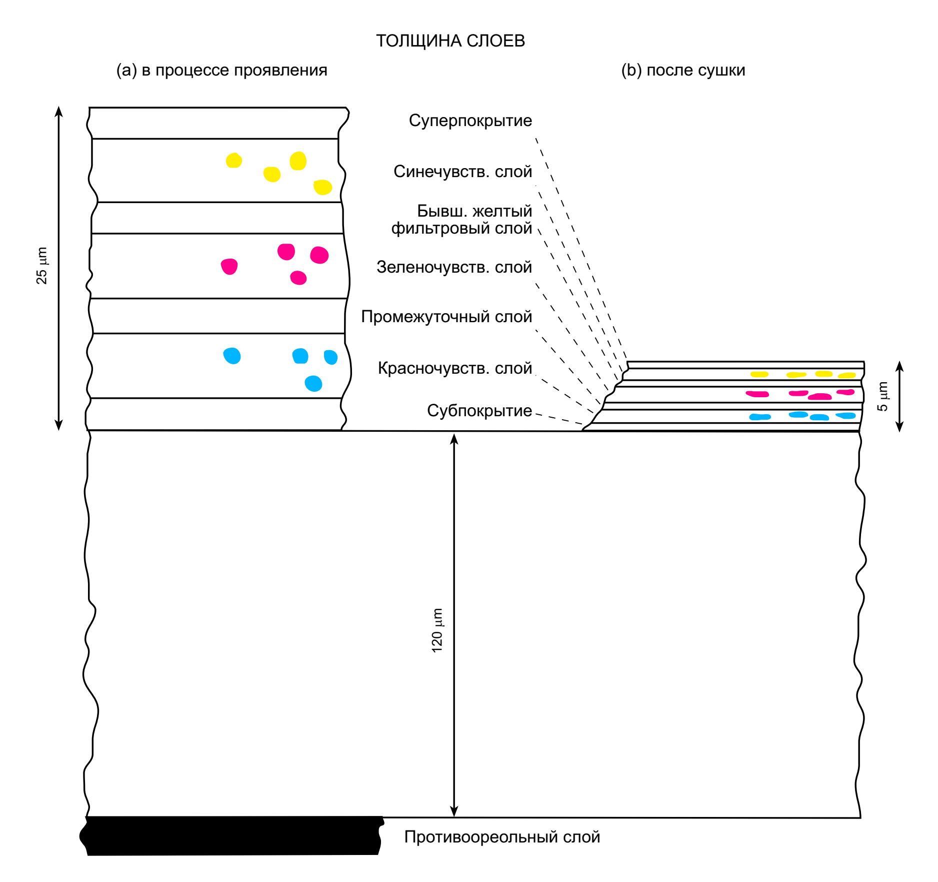


Рис. 18.5 (a) — толщина компонентов типичной цветной многослойной фотопленки, набухшей при проявлении в водно-щелочном растворе; (b) — то же, но после сушки. В результате усадки, возникающей в процессе сушки, облака красителей расплющиваются до 1/5 исходного размера.

ния она очень близка к сферической, сие длится лишь в период обработки фотоматериала, то есть до тех пор, пока слои остаются разбухшими и влажными. При сушке слои усаживаются (примерно в пять раз), в результате чего облака красителей уплощаются (см. рис. 18.5).

18.7.1 Визуальная зернистость цветных изображений

Результирующая визуальная зернистость цветных изображений есть следствие суперпозиции голубых, пурпурных и желтых гранулярных структур фотоматериала (рис. 18.1). Следовательно, можно говорить, что при рассматривании цветных изображений ощущение зернистости колеблется как по субъективной яркости, так и по хроматике. Однако в большинстве случаев хроматические колебания гранул цветного фотоматериала лежат сразу под порогом зрительного восприятия и в основном незаметны. Хроматические отличия возникают тогда, когда стимулы от каждого элемента цветного изображения оказывают воздействие на колбочки всех трех типов, то есть когда возникает визуальный цветоразностный сигнал.

Коль скоро любые колбочки вносят определенный вклад в ахроматический (субъективнояркостный) сигнал зрительной системы (см. раздел 19.7), для возникновения отличий по субъективной яркости необходимо возбудить колбочки лишь одного типа.

Поскольку колбочки в центральной ямке сетчатки распределены хаотично (Mollon и Bowmaker, 1992), отличия по субъективной яркости зерен становятся заметными при увеличении изображения в 4 раза меньшем, чем отличия хроматические (Hunt, 1967). Следовательно, мы видим, что зернистость цветных фотоматериалов хорошо коррелирует лишь с колебаниями фотометрической яркости зерен.

18.7.1.1 Оценка визуальной зернистости кинокопий

При использовании негативных и позитивных кинопленок зачастую важно знать, каков вклад каждой из них в результирующую визуальную зернистость экранного изображения.

В контексте кинопоказа удобным способом такого учета является изготовление дополнительной контрольной копии, в которой все кадры на дубль-пленке выполнены с одного неподвижного кадра пленки негативной: негатив в этом случае будет формировать на позитиве т.н. *статичный зерновой паттерн*, но при этом все движущиеся (роящиеся) зерна будут продуктом лишь позитивной пленки.

Методику можно усовершенствовать, выполнив три контрольных копии, в каждой из которых статичный зерновой паттерн получен с одного из трех красочных слоев негатива: таким способом можно учесть вклад каждого из красочных негативных изображений (т.е. голубого, пурпурного и желтого) в общую визуальную зернистость изображения проекционного (Zwick, 1963).

18.7.2 Гранулометрия цветных фотоматериалов

Измерение гранулярности цветных фотоматериалов выполняется с помощью оборудования, схема которого показана на рис. 18.3. При этом используется такая комбинация датчиков и фильтров, при которой спектральные отклики измерительной системы повторяют кривую фотопической световой эффективности («визуальный» фильтр на рис. 18.3).

Значение композитной гранулярности получают, сложив взвешенные пропорции величин гранулярности по голубому, пурпурному и желтому красочным изображениям (измерения проводятся соответственно через красный, зеленый и желтый фильтры) (Ooue, 1960; Zwick, 1963). Пропорции обычно составляют 30% cyan, 60% magenta и 10% yellow, что весьма сходно с пропорциями «красного», «зеленого» и «синего» сигналов в яркостном сигнале цветного телевизора (см. раздел 22.3).

Отметим, что приведенные нами значения пропорций соответствуют просмотру фотопленок на просвет, поэтому когда при дневном освещении рассматривается изображение, выполненное на отражающем носителе, пропорции становятся такими: cyan — 40%, magenta — 45%, yellow — 15% (при лампах накаливания соответственно cyan — 50%, magenta — 40%, yellow — 10%) (Sawyer, 1980).

18.7.3 Зависимость гранулярности от масштаба изображения

Напомним, что среднеквадратичная гранулярность черно-белых серебряных изображений (σ_D) прямо пропорциональна их увеличению (см. раздел 18.4), что было показано как теоретически, так и экспериментально. В отношении изображений красочных это правило срабатывает далеко не всегда.

Отличие продемонстрирует рис. 18.6 (Zwick, 1963), по которому хорошо видно, что

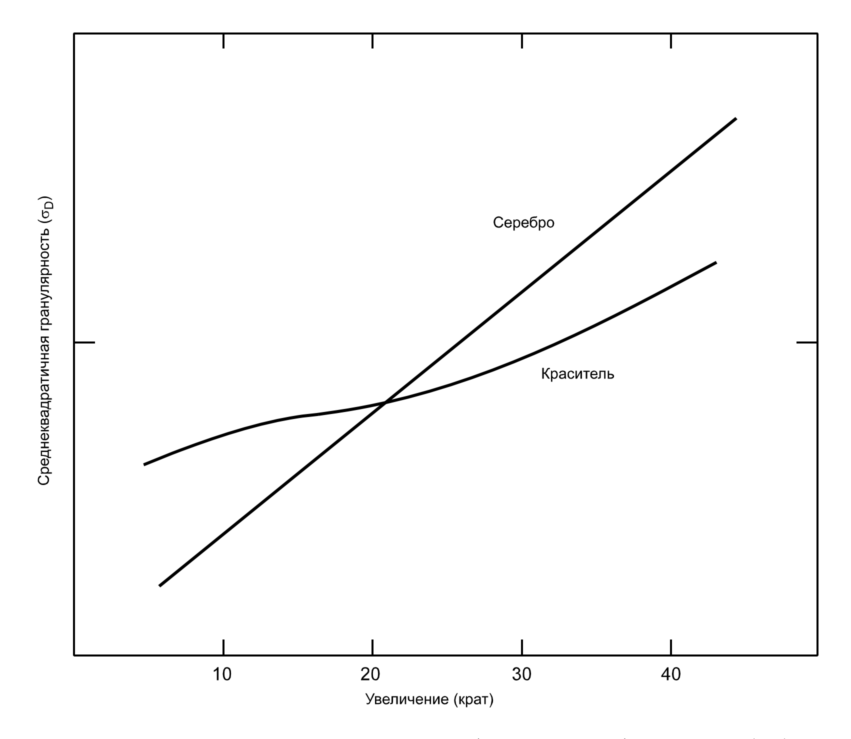


Рис. 18.6 Среднеквадратичная гранулярность серебряных изображений (σ_D) строго пропорциональна увеличению. У красочных изображений зависимость среднеквадратичной гранулряности от степени увеличения нелинейная и у разных фотоматерилов эта нелинейность — разная.

красочное изображение на увеличениях, не превышающих 20 крат, имеет бо́льшую величину σ_D, нежели серебряное, но при увеличениях свыше 20 крат — меньшую.

Отношение увеличения к среднеквадратичной гранулярности у разных цветных пленок разное, и, следовательно, если, к примеру, при измерении прибором одной апертуры величины гранулярности двух разных цветных пленок мы получим сходные результаты, то это не значит, что последние сохранят равенство при измерении с иной апертурой. Эксперименты по визуальной оценке зернистости подтверждают то, что когда две пленки, при некоем увеличении изображения, имеют одинаковую зернистость, их зернистости будут разниться при другом увеличении.

Причиной возникновения описанного феномена является характер облаков красителей, к примеру: когда у одной пленки облака красителя мелкие, но оптически плотные, ее среднеквадратичная гранулярность будет снижаться очень быстро по мере уменьшения коэффициента увеличения изображения. Однако в другой пленке, у которой облака красителя более рыхлые и менее оптически плотные, среднеквадратичная гранулярность может оказаться меньше на бо́льших увеличениях, чем у первой пленки, но выше на малых увеличениях. Следовательно, гранулометрия цветных пленок в идеале должна выполняться при таком размере апертуры, который точнее всего эмулирует характерное для данной пленки увеличение.

18.7.4 Зависимость гранулярности от оптической плотности

Гранулярность черно-белых серебряных изображений растет по мере роста оптической плотности их элементов. В отношении изображений красочных это правило срабатывает не всегда: на участках высоких оптических плотностей облака красителей

порой «склеиваются» друг с другом, вследствие чего гранулярность снижается; в фотоматериалах с внедренными краскообразующими компонентами на очень высоких оптических плотностях куплеры могут полностью превратиться в краситель, и в этом случае неравномерность определится лишь самими масляными каплями или молекулярной дисперсией, а также пустотами, оставшимися от зерен отбеленного серебра (правда, эффект исчезающе мал).

Следовательно, крайне важно, чтобы измерение гранулярности цветных фотоматериалов проводилось на таких оптических плотностях, на которых зернистость заметнее всего. У обращаемых фотопленок это значение лежит в диапазоне примерно от 0.9 до 1.0, поэтому, как правило, измерение гранулярности слайдов проводится по участкам с оптической плотностью равной 1.0 (Zwick, 1972); у цветных негативных пленок ситуация много сложнее, о чем разговор пойдет ниже.

На рис. 18.7 даны результаты измерения среднеквадратичной гранулярности цветной обращаемой фотопленки (Davies, 1970). Мы видим, что показатель гранулярности растет по мере роста оптической плотности и достигает максимума примерно в районе 2.0, после чего остается относительно постоянным. Однако, как уже было показано, высокая гранулярность на высоких оптических плотностях не столь заметна (вследствие относительной затемненности областей высокой оптической плотности при обычном просмотре), и зернистость достигает максимума на оптических плотностях, примерно равных 1.0 (Lythgoe, 1932).

Отметим также, что на рис. 18.7 среднеквадратичная гранулярность дана в логарифмических шкалах (что позволяет добиться лучшей корреляции со зрительным восприятием, нежели в линейных осях).

18.7.5 Зависимость зернистости от величины гранулярности

Зернистость цветных отпечатков, выполненных с негативной пленки (равно как и отпечатков черно-белых), зависит от:

— гранулярности негативной пленки;

— резкости фотоувеличителя (принтера);

— гранулярности, резкости и коэффициента контрастности позитивного фотоматериала;

— величины оптической плотности интересующего элемента позитивного изображения.

Было показано, что когда гранулярность позитивного фотоматериала (как цветного, так и черно-белого) оказывается много ниже гранулярности материала негативного, гранулярность изображения на позитиве растет более или менее пропорционально росту коэффициента контрастности позитивного материала (Zwick, 1965).

Также было показано то, что изменение коэффициента контрастности на 8% ведет к изменению среднеквадратичной гранулярности на 6%: данное изменение согласуется с т.н. *едва заметным отличием* (JND — *just noticeable difference*) в зернистости равномерных полей на визуально значимых оптических плотностях (единица JND-зернистости типичных цветных изображений соответствует изменению среднеквадратичной гранулярности на 15%) (Zwick и Brothers, 1975). Поскольку, в отличие от бромсеребряных, у цветных негативов взаимоотношения визуальной зернистости с их исходной гранулярностью достаточно сложные, последнюю желательно измерять на разных уровнях оптической плотности негативной фотопленки. Величина визуальной зернистости

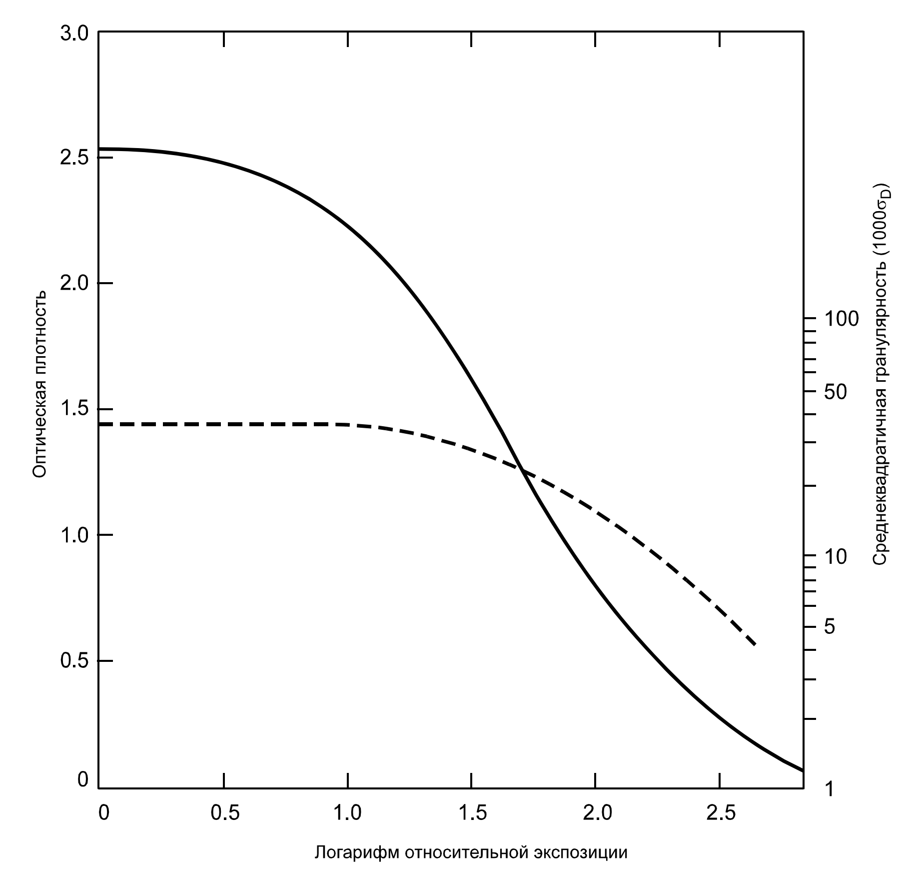


Рис. 18.7 Кривая оптических плотностей (сплошная линия) и кривая среднеквадратичной гранулярности (пунктирная линия) цветной обращаемой пленки как функция от десятичного логарифма экспозиции. Гранулярность достигает максимума на оптической плотности порядка 2.0, при этом максимум зернистости (перцепционный показатель) обычно приходится на 1.0, поскольку в темных областях изображения визуально распознать его гранулярную структуру труднее.

позитивного фотоматериала должна при этом высчитываться из значений гранулярности, полученных при разных уровнях экспозиции фотоматериала.

Описанные принципы в равной мере применимы как к фотобумагам, так и к копировальным дубль-пленкам, хотя при этом, конечно, следует учитывать еще и коэффициент увеличения изображений.

18.7.6 Динамика гранулярности цветных и черно-белых фотопленок

На рис. 18.9 даны результаты измерений среднеквадратичной гранулярности цветной негативной фотопленки в сравнении с тем же показателем у пленки бром-серебряной (черно-белой). Мы видим, что у данной конкретной пленки гранулярность вначале растет по мере роста оптической плотности элементов изображения, достигает максимума, после чего падает, но затем вновь начинает расти, достигает второго максимума (который, правда, уже несколько ниже, чем первый) и вновь падает (Morris и Wait, 1971). Данный тип колебания гранулярности в зависимости от оптической плотности элементов изображения весьма специфичен у цветных фотопленок, и одна из причин тому — двойной полив каждого из светочувствительных эмульсион-



Рис. 18.8 Пример, иллюстрирующий высочайшую резкость, достижимую с помощью субтрактивных цветных фотопленок и современных сканеров (см. разделы 18.16 и 29.7). Воспроизведено с кадра, выполненного на слайд-пленке Kodachrome размером всего лишь 16×25 мм.



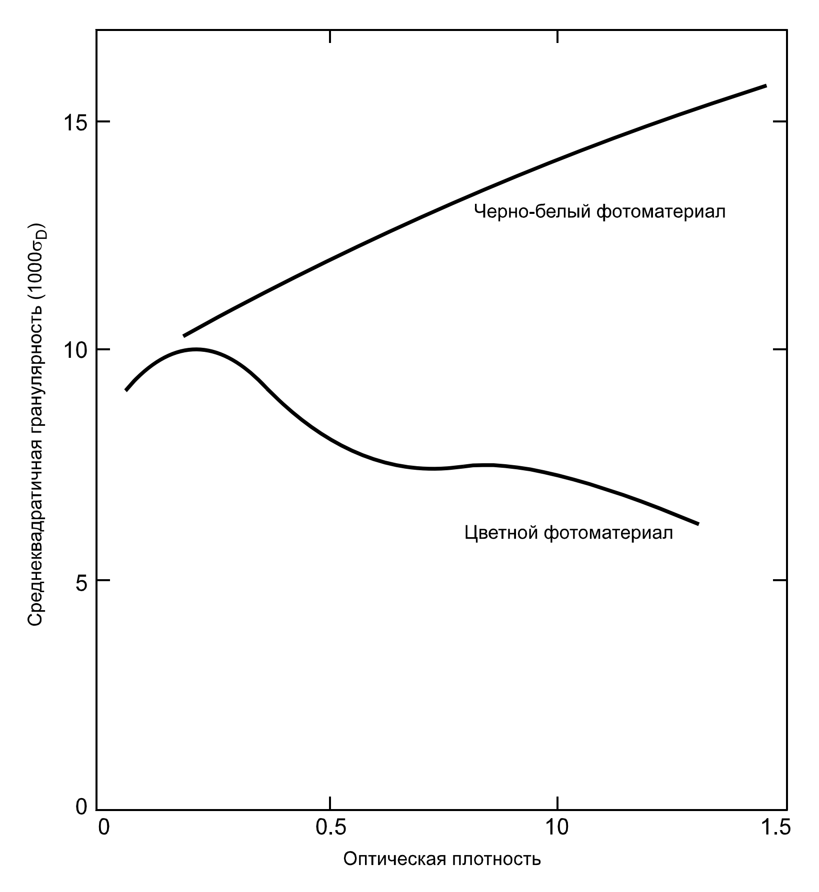


Рис. 18.9 Характеристики среднеквадратичной гранулярности цветной и черно-белой негативных фотопленок. Хорошо видно, что гранулярность цветной пленки с ростом экспозиции начинает быстро расти, а затем падает. Для обеспечения минимума зернистости цветных негативных фотопленок крайне важно избегать их недоэкспонирования.

ных слоев (как уже отмечалось, один из способов повышения фотографической широты фотопленок — это использование двух эмульсий с широким диапазоном размера зерен галоидного серебра).

Однако если нам удастся так изготовить эмульсию, что крупные, высокочувствительные, зерна окажутся у поверхности эмульсионного слоя, а все мелкие, низкочувствительные, около его основания, то, с одной стороны, мы добьемся высокой чувствительности фотоматериала (поскольку высокочувствительные зерна будут подвергаться воздействию света без какого-либо поглощения или рассеяния вышележащими зернами), с другой — увеличим фотографическую широту фотопленки, поскольку чувствительность мелких, низкочувствительных, зерен галоидного серебра, лежащих в основании слоя, благодаря поглощению и рассеянию света вышележащими крупными зернами будет еще ниже.

Одним из приемов, позволяющих добиться требуемого взаиморасположения зерен галоидного серебра, является полив т.н. *двухкомпонентных эмульсионных слоев*: вначале поливается нижняя (мелкозернистая, низкочувствительная) эмульсия, а затем эмульсия верхняя — грубозернистая и высокочувствительная (Kennel, Sehlin, Reinking, Spakowsky и Whittier, 1982; Vervoort и Stappaerts, 1980) (см. рис. 18.10).

Когда описанным выше способом отлита черно-белая эмульсия, гранулярность проявленного изображения по мере роста оптических плотностей его элементов внача-

ле будет быстро расти (поскольку при малых значениях экспозиции на свет в первую очередь реагирует высокочувствительная эмульсия). Вместе с тем на бо́льших значениях экспозиции рост замедлится, поскольку экспонироваться начнет эмульсия низкочувствительная.

Однако, в цветных фотопленках, в которых из-за «склеивания» облаков красителей гранулярность высокочувствительной эмульсии падает по мере роста оптических плотностей, динамика гранулярности может оказаться совсем не той, что показана на рис. 18.9. В тех ситуациях, когда необходим минимум зернистости, при использовании пленок такого типа крайне важно избегать недодержек, и сие, как мы видим, диаметрально противоположно практике черно-белой фотографии, в которой, благодаря росту гранулярности по мере роста оптической плотности, минимальных значений зернистости добиваются на минимально допустимых экспозициях.

Наконец, отметим, что иногда с целью повышения общей чувствительности цветных негативных фотопленок высокочувствительная «красная» эмульсия поливается поверх низкочувствительной «зеленой» (Meyers и Dalton, 1979; Maude, 1980; Vervoort и Stappaerts, 1980) (см. рис. 18.10).

18.8 МЕТОДЫ ПОНИЖЕНИЯ ГРАНУЛЯРНОСТИ ЦВЕТОФОТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Основным методом понижения гранулярности цветных фотопленок является оптимизация соотношения «фотографическая чувствительность / размер галогенсеребряного зерна» в галогенсеребряных эмульсиях, а также соотношения «размер облака красителя / размер галогенсеребряного зерна» в эмульсиях цветных.

18.8.1 Управление выходом красителей

Цветное проявление повышает оптическую плотность и коэффициент контрастности красочного изображения в сравнении с соответствующим ему изображением серебряным. Следовательно, с целью обеспечения адекватного тоновоспроизведения количество галогенида серебра в эмульсии уменьшают. Сие, однако, повышает величину гранулярности, поскольку данная оптическая плотность достигается теперь за счет проявления относительно меньшего числа зерен по данному участку цветного фотоматериала. Таким образом, величину гранулярности можно уменьшить, если понизить эффективность реакции образования красителя, то есть если для образования красителя будет задействовано большее количество активированных зерен галоидного серебра. Добиться сего можно либо несколько уменьшив концентрацию куплера в слое (благодаря чему не все окисленное проявляющее вещество вступит в реакцию сочетания), либо добавив в слои фотоматериала т.н. *конкурентный куплер* (или же в проявитель). Конкурентный куплер, реагируя с частью молекул окисленного проявляющего вещества, образует растворимое соединение, легко уходящее из слоев фотоматериала.

Сегодня в качестве конкурирующего куплера активно используется *цитразиновая кислота*,[1] вводимая в состав цветного проявителя (Thirtle и Zwick, 1964). Сходного эффекта добиваются, используя т.н. DIR-куплеры (см. раздел 17.11) (Barr, Thirtle и Vittum, 1969).

---

[1] Пиридиновое производное, применяемое в процессе «E-6». — *Прим. пер.*

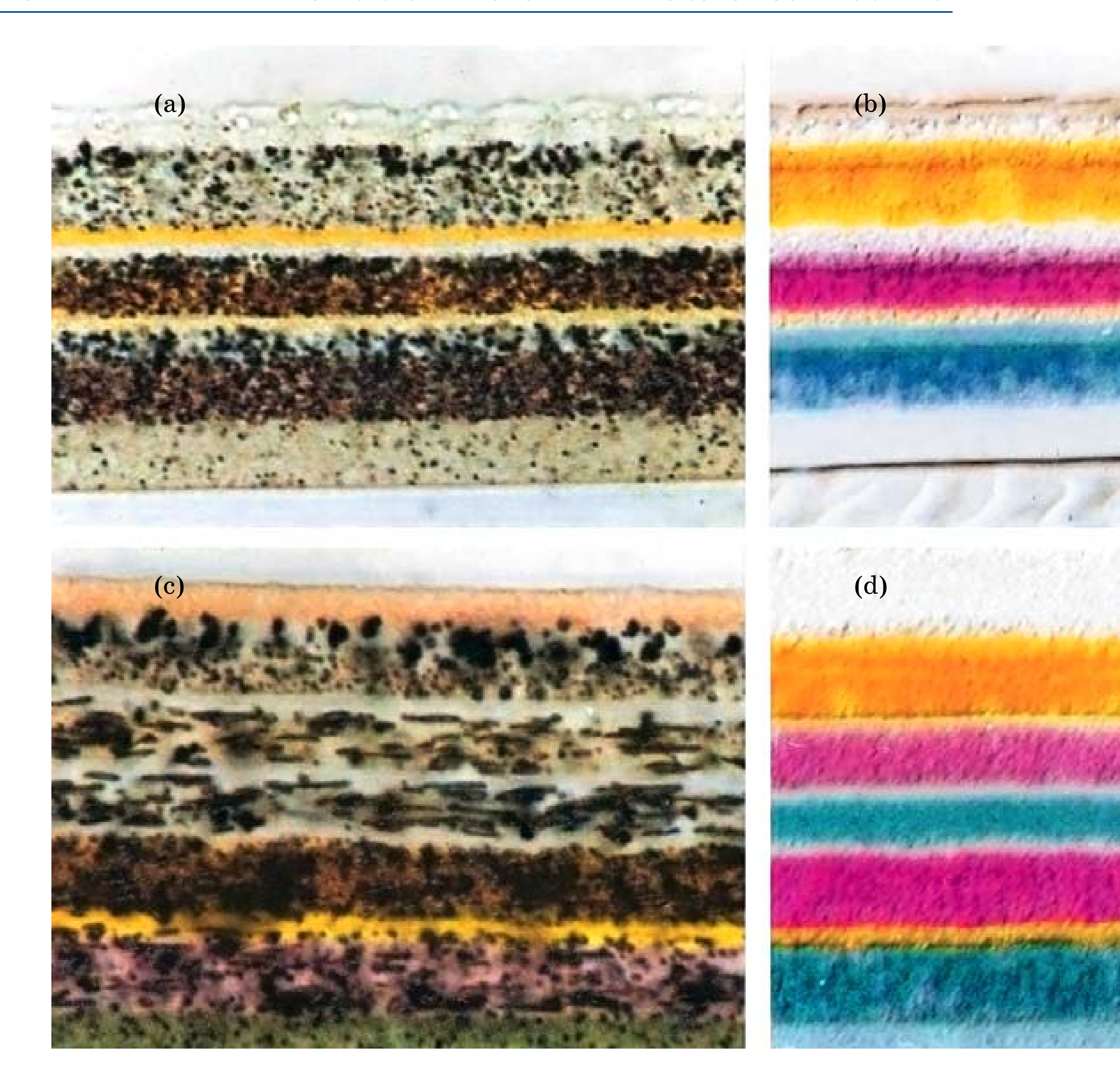
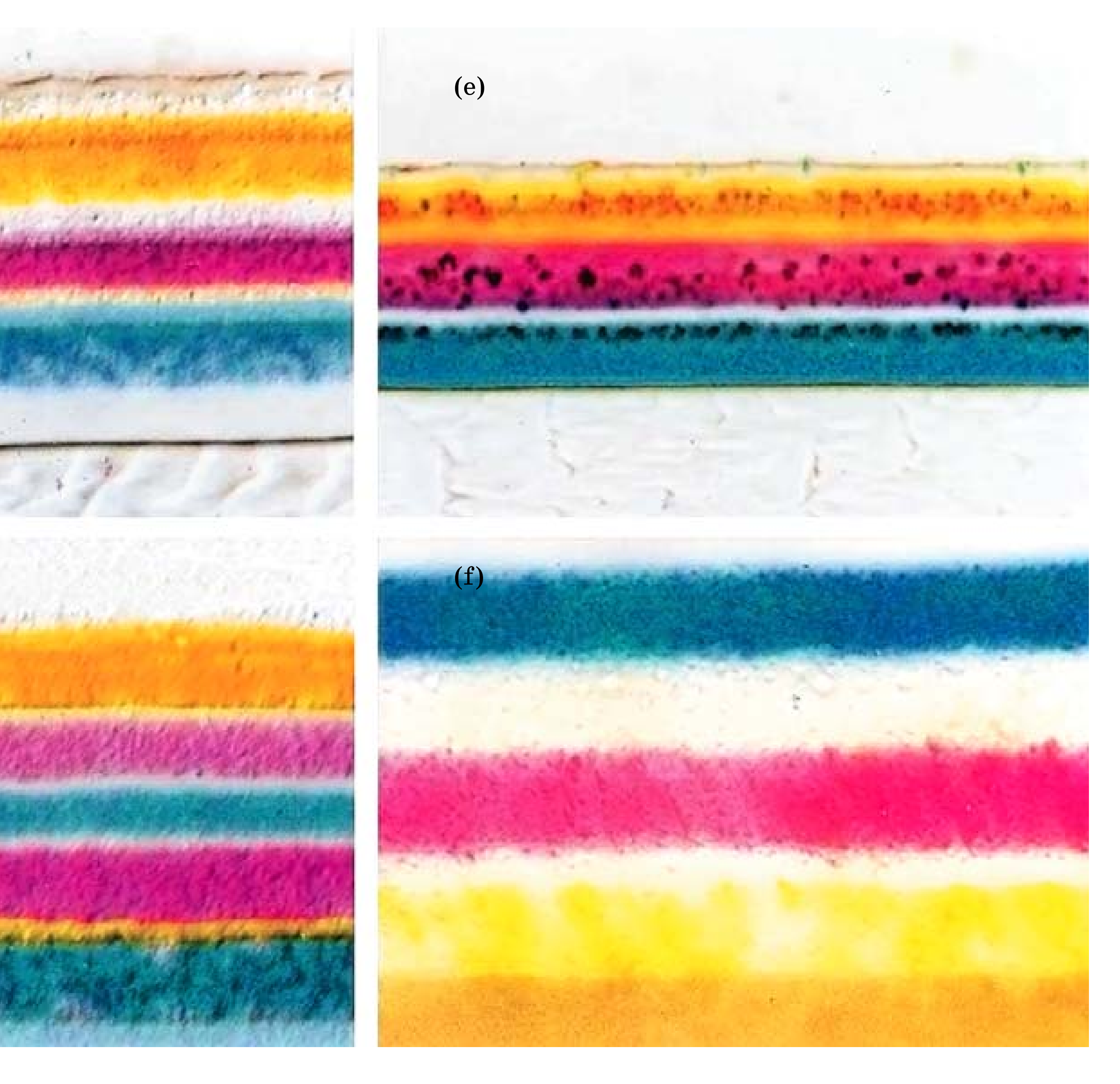


Рис. 18.10 Поперечный разрез эмульсии влажного (разбухшего) цветного фотоматериала, увеличенный в 1100 раз (напомним, что при высыхании толщина эмульсии уменьшается в пять раз):

(a) — типичная негативная фотопленка (Kodacolor II) перед обработкой (засвеченный фрагмент). Синечувствительный слой расположен над желтым фильтровым слоем, что предохраняет нижележащие слои фотоматериала от экспозиции коротковолновым («синим») светом. Нижний слой в данном примере — противоореольный (см. раздел 18.16), над которым хорошо виден красночувствительный эмульсионный слой. Над красночувствительным слоем располагается тончайший промежуточный слой, а поверх него — слой зеленочувствительный. Зерна галоидного серебра в эмульсионных слоях хорошо различимы, однако увеличение недостаточно для того, чтобы продемонстрировать масляные микрокапли, в которых заключены краскообразующие компоненты. Розоватый оттенок красночувствительного слоя и желтоватый оттенок слоя зеленочувствительного обусловлены присутствием окрашенных куплеров;

(b) — та же пленка, но после обработки: в синечувствительном слое образовался yellow-краситель, в зеленочувствительном — magenta, в красночувствительном — cyan. Хорошо видно, что каждый из красочных слоев — двухкомпонентен, а внимательное рассматривание левого верхнего изображения (a) дает возможность разглядеть, что во всех трех слоях верхние субслои содержат гораздо более крупные зерна галоидного серебра, нежели нижние. Таким образом, высокочувствительный компонент в каждом слое находится поверх низкочувствительного, что позволяет поднять общую светочувствительность фотоматериала. В данном примере высокочувствительные компоненты слоев были полностью проявлены, и образованные ими облака красителей слились в единую и равномерную красочную массу; нижние субслои демонстрируют некоторую гранулярность (см. раздел 18.7). Желтый фильтровый слой, восстановленное серебро, непроявленный галогенид серебра, а также противоореольный слой были полностью удалены при обработке (см. раздел 17.9);



(c) — сверхвысокочувствительная негативная фотопленка (Kodacolor VR1000) до обработки (засвеченный фрагмент).
(d) — она же после обработки. Для повышения светочувствительности поверх обычного зеленочувствительного слоя полит высокочувствительный «красный» слой, а поверх него — высокочувствительный «зеленый». В данном примере обычный желтый фильтровый слой отсутствует, поскольку чувствительность эмульсий, использованных в нижних слоях, расширена относительно их исходной коротковолновой чувствительности в направлении средних и длинных волн (чего обычно добиваются путем увеличения соотношения «площадь поверхности зерен галогенида серебра/единица объема слоя», а также за счет придания зернам галоидного серебра таблитчатой формы [T-grain-технология] — см. раздел 18.8). На разрезе необработанной пленки (c) T-зерна заметны в виде тонких черточек. Необесцвечивающийся желтый фильтровый слой, находящийся между красночувствительным и зеленочувствительным слоями, позволяет облегчить приладку хроматического баланса при печати.
(e) — образец цветной обращаемой фотопленки (Kodachrome 25), обработанной проявителем, содержащим краскообразующие компоненты (неэкспонированный фрагмент). В каждом слое высокочувствительный компонент находится поверх низкочувствительного. Хорошо видно, что общая толщина слоев ощутимо меньше, чем в традиционной фотопленке с внедренными куплерами, что дает ощутимый выигрыш в субъективной резкости изображений (см. раздел 12.7).
(f) — цветная фотобумага (Ektacolor) после обработки (засвеченный фрагмент). Yellow-изображение расположено внизу с целью минимизации визуальной различимости фактуры бумажной подложки фотоматериала (см. раздел 18.17). В некоторых цветных пленках с целью достижения максимальной субъективной резкости результирующего изображения magenta-изображение располагается вверху, а yellow-изображение — внизу (см. разделы 12.11 и 18.16).
Микрофотографии любезно предоставлены Фрэнком Джаддом (Kodak Research Laboratories, Harrow).

С помощью уже упомянутых и некоторых других методов размер облаков красителя можно уменьшить, а их количество на единицу площади (при данной оптической плотности) — повысить, и, следовательно, уменьшить величину гранулярности. Было показано, что у цветных изображений, равно как и у изображений серебряных, среднеквадратичная гранулярность при данном размере считывающей апертуры обратно пропорциональна корню квадратному из количества центров активации галоидного серебра (Zwick, 1965).

18.8.2 T-grain-технология

Если на единицу объема эмульсионного слоя повысить площадь поверхности зерен, то тем самым можно увеличить количество красителя, абсорбирующегося на поверхности этих зерен. Понятно, что площадь поверхности зерен проще всего повысить, уменьшив их физический размер (но при этом неизбежно понизится чувствительность фотоматериала). Также существенно поднять площадь поверхности зерен можно, если изменить их форму. Один из путей такого изменения — это выращивание кристаллов т.н. *таблитчатой формы*, то есть, проще говоря, выращивание плоских кристаллов (т.н. *T-grain*-технология).

T-grain-технология повышает как светочувствительность слоев фотоматериала, так и результирующий выход красителей. Плюс к тому за счет использования *T-grain*-кристаллов удается радикально поднять чувствительность серебряных слоев к свету средневолновой («зеленой») и длинноволновой («синей») частей видимого спектра относительно нативной коротковолновой («синей») чувствительности галогенида серебра (в результате чего отпадает всякая необходимость в использовании желтого фильтрового слоя, что, в свою очередь, еще повышает светочувствительность фотоматериала) (см. раздел 18.10).

18.9 РЕЗКОСТЬ ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Коль скоро свет в проявленных фотографических слоях рассеивается, то понятно, что по мере увеличения изображения визуальное размытие границ между элементами этого изображения усиливается, то есть происходит, как говорят, «размытие краев» (в результате чего мелкие детали изображения рано или поздно полностью исчезают). Степень увеличения изображения, при которой данный эффект никак не проявляет себя визуально, является мерой *резкости* этого изображения.

18.9.1 Факторы, влияющие на резкость

18.9.1.1 Гранулярность

Гранулярная структура изображения, безусловно, может оказать влияние на его резкость, но, как правило, сие весьма малозначащий фактор, и помимо него существует ряд других, более важных факторов.

18.9.1.2 Характер оптического изображения

Хорошо известно, что когда т.н. *оптическое изображение*, экспонирующее фотоматериал, размыто (что может оказаться следствием несфокусированности этого изображения объективами фотоаппарата и/или фотопринтера, а также наличия оптических аберраций в этих объективах, или вибрации изображения в период экспозиции, а так-

же низкой глубины резкости объективов), то результирующее изображение на этом фотоматериале в определенной степени размывается вне зависимости от того, насколько рассеивается свет слоями.

18.9.1.3 Химические процессы

Еще одной причиной снижения резкости может явиться разнонаправленная диффузия химических агентов в период обработки фотоматериала. В результате изображение фотографическое окажется лишь размытой копией изображения оптического.

* * *

В заключение раздела отметим, что резкость — это важнейший критерий качества фотографических изображений, который мы обязаны были обсудить в контексте разговора об их структуре и в дополнение к разговору о гранулярности (см. рис. 18.1).

18.10 ФОКУСИРОВКА

Само собой разумеется, что для получения резких изображений нужно, чтобы фотоматериал находился в оптическом фокусе объектива фотоаппарата и/или фотоувеличителя (принтера или копировального аппарата).

18.10.1 Фотоаппараты с фиксированным положением объектива

У простейших камер позиция объектива относительно плоскости фотопленки фиксирована, что несколько ограничивает диапазон расстояний от аппарата до объекта съемки фокусировки (см. раздел 18.11).

18.10.2 Фотоаппараты с переменным положением объектива

Фотоаппараты среднего уровня дают возможность управления расстоянием от объектива до плоскости пленки. Такое управление реализуемо за счет:

— некоего дискретного набора позиций, таких как «общий план», «группа», «портрет»;

— приблизительного позиционирования расстояния по специальной метрической или футовой шкале;

— использования специального дальномера;

— зеркальной системы фокусировки.

18.10.3 Автофокусировка

Автоматическая фокусировка изображения, применяемая в фотоаппаратах высокого класса, осуществима на базе следующих основных принципов:

18.10.3.1 Принцип системы Honeywell Visitronic

Два объектива, находящиеся на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга, образуют два изображения на сенсоре, состоящем из массива CCD-элементов. Специальное зеркало сдвигает одно из изображений до тех пор, пока наборы сигналов от обоих изображений не достигнут максимума корреляции. Зеркало настроено так, что

его позиция четко коррелирует с расстоянием объекта фокусировки (British Journal of Photography, 1977).

18.10.3.2 Принцип системы Polaroid Sonar Autofocus

Принцип системы Polaroid Sonar Autofocus построен на определении времени достижения ультразвуковой волной объекта съемки и ее возврата назад к ультразвуковому детектору фотоаппарата (Mannheim, 1978; Crawley, 1979).

18.10.3.3 Прочие системы автофокусировки

Прочие устройства автофокусировки посылают импульсный свет (или инфракрасное излучение) в направлении объекта съемки и определяют количество света (излучения), вернувшегося назад. Количество вернувшегося света коррелирует с расстоянием до объекта, имеющего средний коэффициент отражения.

* * *

Все перечисленные системы автофокусировки находят применение, но и все они ошибаются в нестандартных ситуациях, к примеру таких, как съемка через оконное стекло. Однако важнее всего отметить, что ни одна из упомянутых систем не в состоянии решить проблему одновременной фокусировки объектива на разноудаленные объекты.

18.11 ГЛУБИНА РЕЗКОСТИ

Когда мы рассматриваем ту или иную сцену, то создается впечатление, что все ее объекты (на какое бы расстояние они ни были удалены от нас) находятся в фокусе. Однако на самом деле сие верно лишь отчасти, поскольку глаз непрерывно «сканирует» сцену от предмета к предмету, оперативно меняя при этом свое фокусное расстояние (т.н. явление *аккомодации*, способность к которой с возрастом снижается, что проявляет себя в затруднении фокусировки при чтении): так происходит потому, что зрение в первую очередь ориентировано на распознавание объектов, а не на исследование оптических феноменов.

Очевидно, однако, что создание документально точного изображения сцены требует того, чтобы объекты, расположенные на разных расстояниях от фотоаппарата, были воспроизведены в изображении этой сцены равновелико резкими (см. рис. 6.20), то есть, т.н. *глубина резкости* изображения должна быть достаточно большой.

Достижение необходимой глубины резкости предъявляет к объективу фотоаппарата определенные требования, речь о которых ниже.

Чтобы вычислить диапазон расстояний, в котором значимые объекты сцены на ее изображении будут выглядеть приемлемо резкими, необходимо сделать допущение, что два точечных объекта создают на задней поверхности объектива два точечных изображения, визуальное угловое расстояние между которыми не превышает 1/1000 радиан (3.6 угловых минуты), что эквивалентно объекту диаметром 0.25 мм, рассматриваемому с расстояния 250 мм. Следовательно, если объектив камеры сфокусирован по предметам, расположенным на плоскости, удаленной от объектива камеры на расстояние l_1, то объекты, расположенные на двух других плоскостях, удаленных от объектива соответственно на l_0 и l_2, будут резкими, если точки, расположенные на этих плоскостях, образуют на задней поверхности объектива изображения, угловое рас-

стояние между которыми не превышает 1/1000 радиан (при условии, что изображение рассматривается в верной перспективе). То есть, размытие изображения начинается тогда, когда угловое расстояние между изображениями двух точек на задней поверхности объектива выходит за пределы ±1/1000 радиан. Следовательно, если диаметр объектива равен «d», то:

$$d / l_0 - 1/1000 = d / l_1 = d / l_2 + 1/1000,$$

что можно переписать как:

$$l_0 = 1000d / (n+1) \qquad l_2 = 1000d / (n-1)$$

где $n = 1000d/l_1$.

Величина $1000d$ именуется *гиперфокальным расстоянием*, и ее значение приравнивается к l_0, когда $l_1 = \infty$. Уравнения для l_0 и l_2, приведенные выше, наглядно демонстрируют то, что когда объектив сфокусирован на расстояние l_1, равное $1/n$ гиперфокального расстояния, то глубина резкости будет лежать в пределах от $1/(n + 1)$ до $1/(n - 1)$ этого расстояния.

Когда же к глубине резкости предъявляются особо строгие требования, гиперфокальное расстояние следует увеличить от $1000d$ до бóльших значений, например до $2000d$.

Таким образом, глубина резкости зависит только от n и d, однако $n = 1000\mathrm{d}/l_1$. Следовательно, для любого значения l_1 (расстояние фокусировки) глубина резкости зависит только от d — диаметра объектива.

Отметим, что глубина резкости совсем не зависит от фокусного расстояния объектива. Однако освещенность пленки (при объективе данного диаметра) обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния, поэтому при данных глубине резкости и светочувствительности пленки короткофокусные объективы могут работать при меньших уровнях освещенности сцен, чем длиннофокусные.

18.11.1 Передача перспективы

Корректная передача перспективы достигается тогда, когда дистанция съемки равна фокусному расстоянию объектива фотоаппарата умноженному на кратность увеличения, при котором рассматривается результирующее изображение сцены.

В массовой фотографии верная передача перспективы достигается тогда, когда изображение, увеличенное до 150×200 мм (250 мм по диагонали), рассматривается с расстояния 250 мм: дело в том, что фокусное расстояние типичного объектива примерно равно диагонали кадрового окна, и, следовательно, при данной степени увеличения расстояние просмотра оказывается равным фокусному расстоянию умноженному на кратность увеличения.

Вместе с тем типичный размер любительских фотокарточек составляет примерно 100×150 мм (180 мм по диагонали), и обычно они рассматриваются с расстояния в полтора раза большего, чем необходимо для правильной передачи перспективы, что, однако, позволяет повысить глубину их визуальной резкости. Правильная же передача перспективы отпечатками такого размера требует вдвое большего, чем диагональ кадрового окна, фокусного расстояния объектива. Такие объективы часто относят к категории т.н. «телеобъективов».

18.12 ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

18.12.1 Разрешающая способность

Простейшим путем количественной оценки резкости является измерение паттерна тончайших линий или мельчайших точек, воспроизводимого данной системой без видимых потерь. Такие измерения, именуемые измерениями *разрешения* (изображения) или *разрешающей способности* (оптической или цветовоспроизводящей системы) вполне применимы к некоторым ситуациям, особенно к тем, при которых заранее выбрана соответствующая контрастность тестового объекта. Однако измерения эти не всегда устойчиво коррелируют с ощущением визуальной резкости: изображение высокого разрешения может в сравнении с изображением гораздо меньшего разрешения оказаться визуально нерезким и наоборот.

18.12.2 Частотно-контрастная характеристика

В контексте разговора о резкости весьма удобным критерием оценки работы систем визуализации является т.н. *частотно-контрастная характеристика* (*функция передачи модуляции, модуляционно-трансферная функция — modulation transfer function — MTF*), указывающая на степень снижения контраста между мельчайшими деталями изображения в сравнении с таковыми в регистрируемой сцене.

Рабочей величиной частотно-контрастной характеристики является т.н. *коэффициент передачи модуляции*, представляющий собой отношение величины контраста между элементами изображения объекта к величине контраста между элементами самого объекта.

Заметим, что коэффициент передачи модуляции обычно равен 1.0 (100%) в отношении крупных деталей и 0 (0%) в отношении тех деталей, которые настолько мелки, что совершенно неразличимы: все промежуточные значения коэффициента будут являться удобной мерой разрешающей способности системы или разрешения изображения.

18.12.3 Расчет коэффициента передачи модуляции

Чтобы вычислить коэффициент передачи модуляции необходимо определиться со способом сравнения контраста изображения с таковым у объекта (при разных уровнях мелкости деталей). Обычно прибегают к использованию т.н. *синусоидальных тестовых объектов*. В тестовом объекте, что показан на рис. 18.11, фотометрическая яркость деталей (L) синусоидально меняется по всей его протяженности (то есть мы говорим, что L прямо пропорциональна $\sin x$, где x — это длина объекта). Частота синусоидальных колебаний, как правило, меняется дискретно, в результате чего объект разделяется на участки, содержащие паттерны элементов (обычно линий) различной степени мелкости (Lamberts, 1963).

Величины контраста (C) объекта и изображения объекта обычно определяются по формуле:

$$C = \frac{L_{\mathrm{MAX}} - L_{\mathrm{MIN}}}{L_{\mathrm{MAX}} + L_{\mathrm{MIN}}}$$

где L_{MAX} и L_{MIN} — соответственно максимальная и минимальная фотометрические яркости в объекте или изображении объекта по данной пространственной частоте.

Если контраст синусоидального тест-объекта на некоей пространственной частоте обозначить как C_{o}, а контраст изображения синусоидального тест-объекта на той же

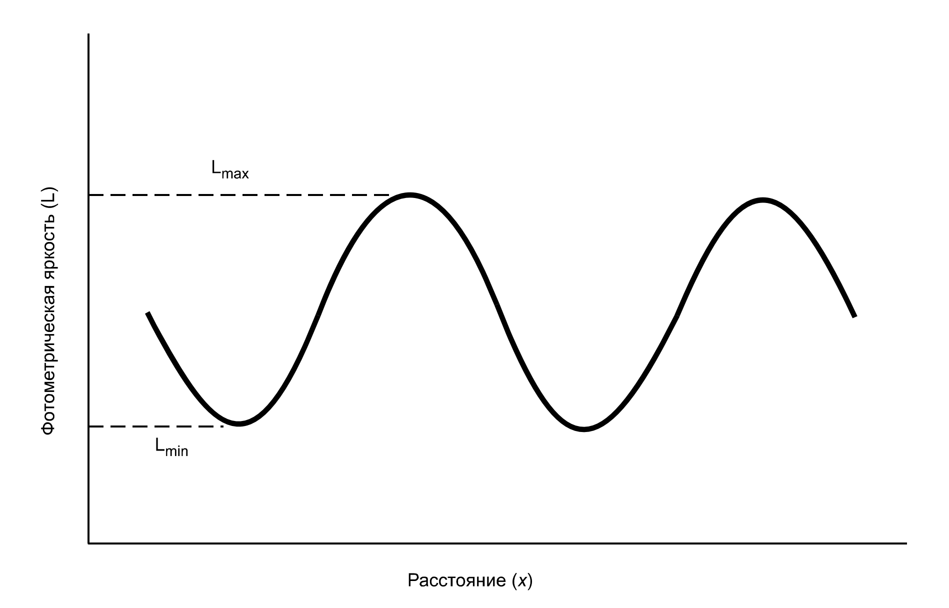


Рис. 18.11 Распределение фотометрических яркостей (L) по длине (x) синусоидального тест-объекта с амплитудой $L_{MAX} - L_{MIN}$. Колебания L пропорциональны $\sin x$.

пространственной частоте как C_i, то коэффициент передачи модуляции по данной пространственной частоте стимулов будет представлять собой C_i/C_0. Характер изменения значения коэффициента передачи модуляции по мере изменения пространственной частоты синусоидальных паттернов и будет представлять собой *частотно-контрастную характеристику* (*MTF*) изображения объекта (то есть MTF репродукционной системы). Таким образом, значение коэффициента передачи модуляции мы рассматриваем как функцию от пространственной частоты паттернов тестового объекта.

Наконец, отметим, что весьма удобен и нагляден график MTF (рис. 18.12), по оси абсцисс которого отложена пространственная частота стимулов, а по оси ординат — коэффициент передачи модуляции: в нашем примере на пространственной частоте в 50 цикл/мм коэффициент передачи модуляции, измеренный по центру объектива, уменьшается до 50%, а при частоте 100 цикл/мм — до 20%.

18.12.4 Синусоидальные тест-объекты

Существует по меньшей мере три причины того, почему в качестве тестовых используются объекты с т.н. *синусоидальным распределением вариаций фотометрических яркостей* составляющих:

— во-первых, как уже было показано, синусоидальное распределение фотометрических яркостей в тест-объекте остается синусоидальным и в его изображении (даже когда меняется амплитуда) вне зависимости от характеристик системы, воспроизводящей это изображение;[1]

---

[1] Сказанное справедливо, разумеется, только в отношении *линейных* систем, в которых выходной сигнал пропорционален входному; если в репродукционном процессе имеет место нелинейный этап (что бывает, когда фотометрические яркости преобразуются в электрические сигналы, как, скажем, в телевидении, или в домены серебра или красителей — как в фотографии), то возникают отклонения от синусоидального распределения (см. раздел 18.13).

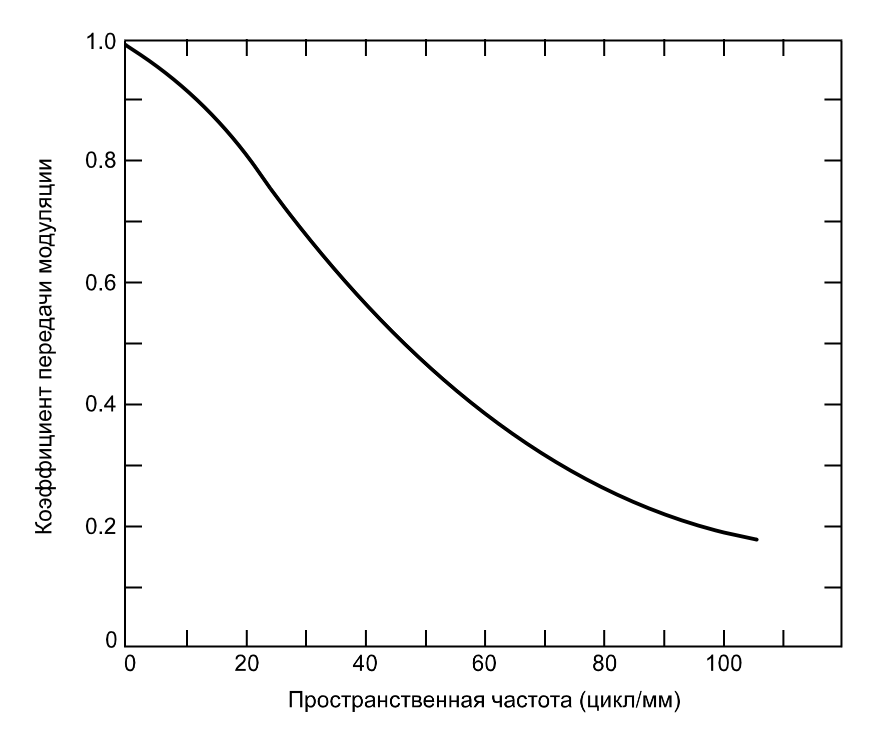


Рис. 18.12 Частотно-контрастная характеристика (функция передачи модуляции — MTF) объектива, измеренная в точке его оптической оси. Снижение контраста до 50% происходит на пространственной частоте 50 цикл/мм и до 20% — на частоте 100 цикл/мм.

— во-вторых, к имеющемуся набору пространственных распределений всегда можно добавить любое другое распределение подходящей частоты и амплитуды: на рис. 18.13 дан пример того, как с помощью разных синусоидальных распределений можно синтезировать т.н. *меандр* — прямоугольное колебание (Selwyn, 1959);

— в-третьих, когда синусоидальное изображение проходит по цепочке из нескольких цветорепродукционных систем, то общий коэффициент передачи модуляции по каждой из частот будет равен произведению отдельных коэффициентов передачи модуляции каждой из подсистем. Следовательно, общую частотно-контрастную характеристику системы можно получить произведением индивидуальных частотно-контрастных характеристик подсистем по каждой из частот.[1]

На рис. 18.14 даны частотно-контрастные характеристики двух объективов, измеренные по центру каждого из них: мы видим, что разрешающая способность и визуальная резкость могут не коррелировать друг с другом. Разрешающая способность объектива «B» выше, чем у объектива «A», на что указывают бóльшие цифры MTF B-объектива по пространственным частотам свыше 60 цикл/мм. Однако, несмотря на то, что MTF A-объектива на высоких частотах ниже, чем MTF объектива «B», она заметно выше на всех частотах до 60 цикл/мм. Следовательно, в ситуациях, при которых некие сторонние факторы ведут к полной потере визуальной информации на пространственных частотах свыше 60 цикл/мм (например, при рассеянии света в фотографических слоях или при нехватке остроты зрения) — B-объектив даст ощутимо худшую визуальную резкость изображения.

[1] Хотя, опять же, сие справедливо только в том случае, если все подсистемы линейны.

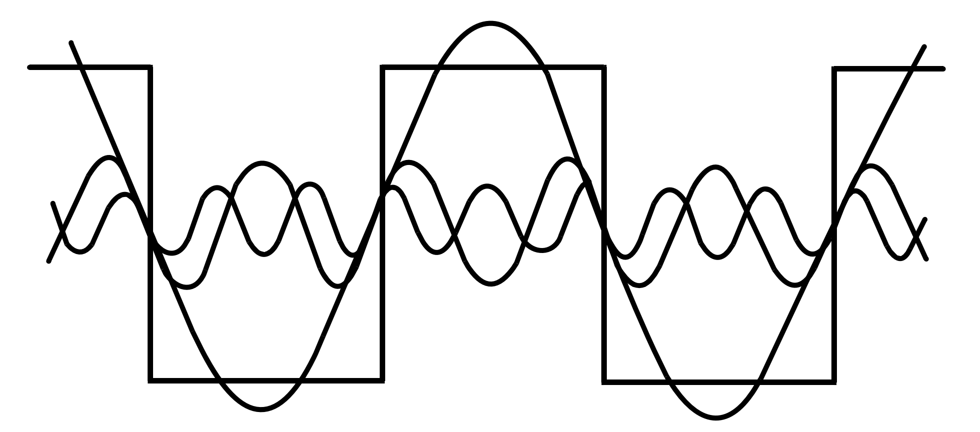


Рис. 18.13 Квадратно-волновое распределение света аппроксимируется наложением нескольких синусоидальных волн. Показаны одна несущая частота и первые две гармоники. Однако идеальное воспроизведение квадратной волны требует бесконечного числа гармоник.

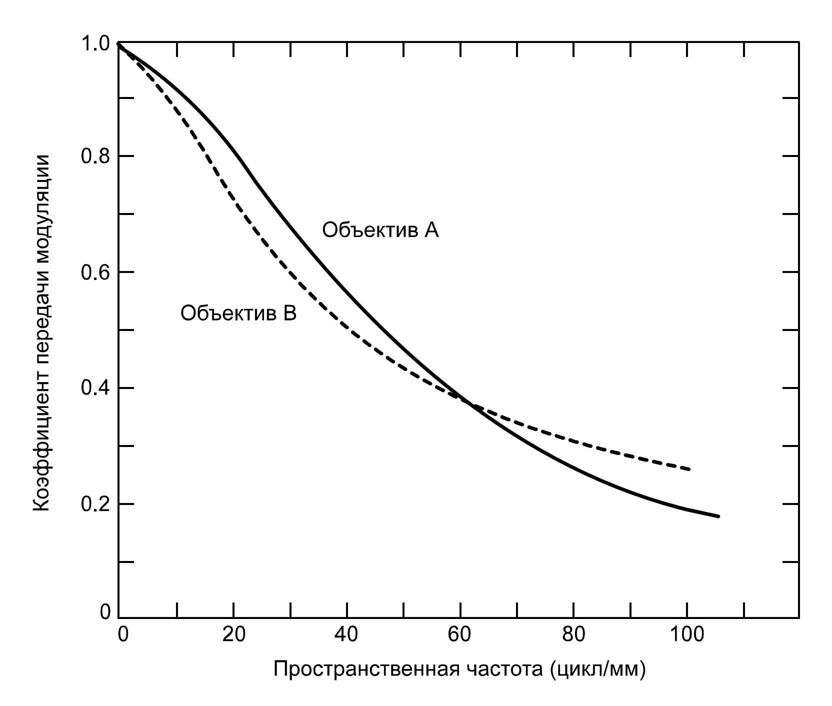


Рис. 18.14 Частотно-контрастная характеристика двух объективов (измеренная в точке их оптической оси): у В-объектива разрешающая способность больше, однако А-объектив дает субъективно более резкие изображения в системах, в которых все пространственные частоты, превышающие 60 цикл/мм, неэффективны.

Разумеется, исчерпывающая оценка этих двух объективов требует сравнения их частотно-контрастных характеристик не только по центру, но и на других участках образуемого ими светового пятна.[1]

[1] В этом случае строят трехмерные графики MTF, где по дополнительной оси откладывается удаление от оптической оси объектива. — *Прим. пер.*

18.13 ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

18.13.1 Общие положения

Как уже было сказано выше, когда свет, несущий оптическую информацию об объекте, преобразуется в электрические сигналы (как, скажем, в телевидении) или в домены серебра или красителей (как в фотографии), возможно возникновение разного рода нелинейностей. В данном случае синусоидальный входной сигнал не даст простого синусоидального выхода той же частоты, но при этом возникнут т.н. *сигналы гармонических частот* (*гармоники*).

Рассеяние света в слоях фотографической эмульсии — это линейный процесс, и, следовательно, MTF фотоматериала на различных частотах будет определяться отношением:

$$C_i = \frac{H_{MAX} - H_{MIN}}{H_{MAX} + H_{MIN}}$$

где H — это величины экспозиций разных участков этого материала.

H-величины зависят от характера обработки пленки, способа измерения оптических плотностей, а также от того, применялась ли для определения величины «H» характеристическая D-log$H$-кривая. Эту кривую можно не использовать лишь в том случае, если она соответствует всем пространственным частотам, что бывает только тогда, когда процесс химической обработки фотоматериала равновелико активен в отношении участков всех экспозиций, независимо от пространственной частоты элементов изображения (то есть при условии, что не возникает никаких пограничных или краевых эффектов — см. раздел 18.16). В таких случаях MTF фотоматериала не будет зависеть от уровня экспозиции и степени проявления.

В процедуре экспонирования фотоматериала обычно принимает участие тот или иной объектив, и, следовательно, MTF фотоизображения представляет собой комбинацию частотно-контрастных характеристик этого объектива с частотно-контрастными характеристиками фотоматериала. Самостоятельное значение MTF фотоматериала получают, разделив значение общей MTF (по каждой из пространственных частот) на MTF объектива по тем же пространственным частотам.

Однако же в тех случаях, когда степень (или характер) проявки зависит от пространственной частоты элементов изображения, при определении величины «H» должны использоваться разные D–log$H$-кривые — каждая по «своей» пространственной частоте. Однако так поступают редко и используют обычно общую, единую D–log$H$-кривую.

Итак, в данном случае мы получим то, что можно назвать *фотографическим коэффициентом передачи модуляции* (C_e/C_0), где C_e — т.н. *эффективный фотографический контраст*, рассчитываемый по уравнению:

$$C_e = \frac{H'_{MAX} - H'_{MIN}}{H'_{MAX} + H'_{MIN}},$$

где H' — т.н. *эффективная экспозиция*, найденная по общей D–log$H$-кривой. Использование D–log$H$-кривой, отличной от кривой, единственно верной по всем частотам, обычно вносит нелинейность в работу системы, поскольку имеют место изменения в форме кривой или коэффициенте контрастности.

Отметим, что расчетные значения H' не будут соответствовать строго синусоидальной волне, однако сами по себе кривые фотографического коэффициента передачи модуляции, которые мы вправе назвать *фотографическими частотно-контрастными характеристиками* (*фотографическими MTF*), будут базироваться на величине эффективной экспозиции (H'), включая эффекты фотообработки (что практично при оценке качества фотоматериала как регистратора изображений, в особенности при возникновении краевых эффектов).

18.13.2 Краевые эффекты

На рис. 18.15 показан набор MTF-кривых. Мы видим, что значения фотографической MTF одной их этих кривых на низких пространственных частотах превышают 1.0 (100%): сие есть результат возникновения т.н. *краевых* (*пограничных*) *эффектов* при обработке фотоматериала. Краевые эффекты ведут к тому, что пространственно неоднородные изображения фиксируются с бо́льшими микроконтрастами, чем однородные с относительно крупными равномерными областями (последние, кстати говоря, используются при построении D–log$H$-кривой).

Краевые эффекты могут возникать как на высоких, так и на низких пространственных частотах и не ограничиваются теми частотами, на которых фотографическая MTF больше 1.0: фактически на высоких пространственных частотах краевые эффекты представляют бо́льшую пропорцию визуального отклика (что, разумеется, не фиксируется фотографическими MTF-кривыми).

18.13.3 Ореолообразование

Когда на очень низких пространственных частотах кривые фотографической MTF опускаются существенно ниже 1.0 (к примеру, как левый конец P-кривой на рис. 18.15), сие свидетельствует о том, что свет, отраженный от подложки фотоматериала, проходит при этом относительно толстый слой вещества. Данный феномен именуется *ореолообразованием*, а его максимально возможное подавление — это миссия противоореольных слоев, описанных в разделах 17.9 и 18.16.

18.13.4 MTF кинокопировальных систем

При изготовлении кинокопий, то есть при копировании изображения с одной пленки на другую, желательно знать, как фотографические MTF каждой из пленок объединяются в единую MTF копировальной системы.

Если используемые фотоматериалы ведут себя линейно, то их частотно-контрастные характеристики можно объединить простым перемножением значений MTF обеих пленок и оптики копировального аппарата по каждой из пространственных частот. Однако мы уже говорили о том, что краевые эффекты вносят определенную нелинейность в фотографические MTF-кривые, построенные обычным путем, и нелинейность эта может усилиться на стадии копировки, поскольку входные данные дубль-пленки базируются на коэффициенте пропускания пленки оригинальной, коэффициент контрастности которой зачастую отличен от 1.0, особенно у негативов. Однако даже когда коэффициент контрастности негатива равен 1.0 — это фактически −1.0, и поэтому выходные данные оказываются пропорциональными не входным, а обратным входным данным.

Практика свидетельствует, однако, что в том случае, когда фотографические MTF

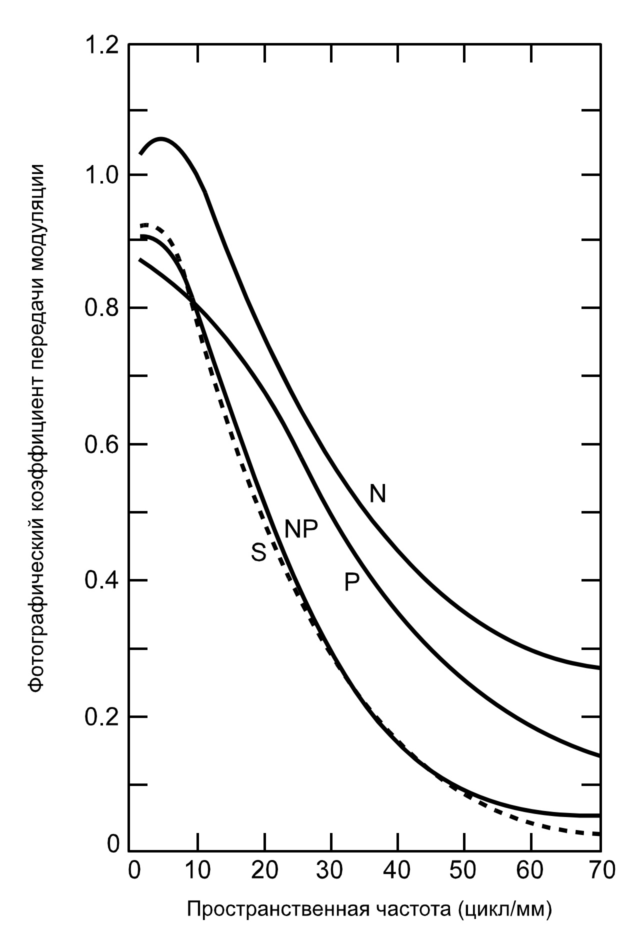


Рис. 18.15 Фотографическая функция передачи модуляции (частотно-контрастная характеристика) двух черно-белых пленок:

— кривая N — негативная пленка;

— кривая P — позитивная дубль-пленка;

— NP — кривая MTF каскадной комбинации N и P (получена умножением каждого из значений N на P-значения по каждой из пространственных частот);

— S — кривая сквозной фотографической MTF системы, выполняющей контактное копирование с пленки N на пленку P. S-кривая получена измерением колебаний оптической плотности позитивной дуль-пленки (P) по образцам разной пространственной частоты, скопированным с изображения синусоидного тест-объекта на негативной пленке N;

— для получения уровней эффективной экспозиции негатива, соответствующих колебаниям оптической плотности на дубль-пленке использовалась кривая *D–LgH*, построенная по крупным равномерным областям. Отношение контраста между этими уровнями к контрасту между образцами, освещенными экспонирующим светом, даны как фотографическая функция передачи модуляции копировальной системы (S).

каждой из пленок плавно понижаются по мере роста пространственной частоты (каскадируют), то, даже невзирая на все нелинейности, простое умножение коэффициентов MTF по каждой из частот дает неплохую корреляцию расчетной результирующей MTF системы с MTF экспериментальной. Экспериментальное определение результирующей MTF проводится путем измерения колебаний оптической плотности по каждой из пространственных частот в финальном изображении и с использованием D–log$H$-кривой, общей для всей фотографической системы (часто называемой

копир-кривая), позволяющей согласовать эффективные экспозиции (H'). Из последних вычисляется величина C_e, предназначенная к последующему сравнению с C_0.

Согласованность индивидуальных фотографических MTF и их каскад будут оптимальными, когда MTF оптической системы принтера (фотоувеличителя, копировального аппарата) не ниже, чем MTF оригинала, и при условии, что коэффициент контрастности негативного материала достаточно мал, а позитивного материала — достаточно велик (что чаще всего и бывает на практике).

На рис. 18.13 кривая «N» представляет фотографическую MTF негативной пленки, кривая «P» — MTF позитивного фотоматериала, кривая «NP» свидетельствует о том, что кривые «N» и «P» каскадируют более или менее синхронно, а кривая «S» — копир-кривая MTF копировальной системы, в которой изображение копируется с N-пленки на P-пленку. Мы видим, что кривые «NP» и «S» достаточно хорошо согласованы между собой (Lamberts, 1961): сие указывает на то, что MTF контактной печати на всех пространственных частотах весьма близка к 1.0 и что эффекты нелинейности крайне малы.

18.14 КОЭФФИЦИЕНТ РЕЗКОСТИ

Общая оценка резкости цветорепродукционных систем и воспроизводимых ими изображений иногда проводится в показателях площадей под кривыми фотографической MTF (см. рис. 18.5), то есть, в контексте разговора о частотно-контрастных характеристиках систем и изображений, мы говорим о *коэффициенте резкости* (Crane, 1964).

Выполняя расчеты коэффициентов резкости, мы делаем поправку на то, что максимум отклика человеческого зрения приходится на стимулы с пространственными частотами порядка 3 цикл/град,[1] и меньшие значения отклика на бо́льших и меньших пространственных частотах (Schade, 1956; DePalma и Lowry, 1962).

Коэффициент резкости рассчитывается по специальному эмпирическому уравнению (уравнение Крэйна):

$$120 - 25\mathrm{Lg}(C_1 + C_2 + C_3 + \ldots C_n),$$

где: $C_1 = (200m_1/a_1)^2$, $C_2 = (200m_2/a_2)^2$ и т.д.; a_1 — площадь (в мм$^{-1}$) под MTF-кривой первого элемента системы, a_2 — второго элемента системы и т.д.; m_1, m_2 и т.д. — кратность увеличения каждого элемента, вычисляемая как отношение ширины изображения на сетчатке глаза наблюдателя к ширине изображения в данном элементе. Константы в уравнении подобраны так, что единица SMT-резкости системы соответствует едва воспринимаемому отличию в резкости визуальной: значения, превышающие 90, соответствуют высокой визуальной резкости, а те, что ниже 80, — низкой.

Стоит сказать, что репродукционная система может состоять из множества элементов, к примеру: фотоаппарата и его объектива, негативной пленки, первого принтера, первой промежуточной пленки, второго принтера, второй промежуточной пленки, третьего принтера, дубль-пленки, проектора и его объектива, экрана и наблюдателя, то есть — до двенадцати этапов репродукционного процесса и у каждого свое C-значение, включаемое в уравнение Крэйна.

---

[1] Что соответствует 10 цикл/мм сетчатки или 0.75 цикл/мм изображения при его рассматривании с расстояния в 250 мм.

Несмотря на то что принцип измерения SMT-резкости дает весьма практичные результаты, лучшие корреляты с результатами субъективной оценки резкости получают, используя значение площади под кривой общей для всей системы фотографической MTF (особенно когда в состав систем входят пленки с выраженными химическими краевыми эффектами), т.е. единой кривой, полученной либо путем прямого измерения с использованием общей D–log$H$-кривой репродукционной системы, либо путем каскадирования отдельных MTF-кривых, выполняемого умножением коэффициентов по каждой из пространственных частот (Gendron, 1973).

В данном случае мы говорим о т.н. *каскадном коэффициенте резкости*, рассчитываемом по уравнению:

$$111 - 21\mathrm{Lg}(200/a_s)^2,$$

где a_s — это площадь под каскадной кривой фотографической MTF системы.

Каскадирование следует выполнять с осторожностью, используя при этом такую шкалу пространственных частот, которая позволяет корректно учесть изменения в увеличении.

Наконец, отметим, что помимо описанных разработан еще ряд методов оценки MTF, неплохо коррелирующих с визуальной резкостью.

18.15 РЕЗКОСТЬ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Мы уже говорили о том, что светорассеяние, возникающее в эмульсионных слоях черно-белого фотоматериала, снижает визуальную резкость изображений. Зерна галоидного серебра не полностью поглощают свет видимой части спектра, и, следовательно, изображение обычно формируется не только на поверхности эмульсионного слоя. (Даже когда в эмульсию добавляются специальные поглощающие красители, как то сделано в некоторых копировальных пленках [см. раздел 18.16], экспонирующий свет равномерно воздействует на эмульсионный слой, поскольку толщина последнего чаще всего не превышает пяти зерен серебра.)

В мелкозернистых эмульсиях свет рассеивается за счет дифракции, а также за счет рэлеевского рассеяния (коль скоро размер некоторых частиц часто оказывается меньше длины световой волны, рассеяние коротковолнового, «синего», света оказывается много бо́льшим, чем рассеяние длинноволнового, «красного»).

В среднезернистых и крупнозернистых эмульсиях, благодаря тому что размер некоторых частиц сопоставим с длиной волны, возникает т.н. *рассеяние Ми*. Плюс к тому имеет место отражение и рефракция света зернами галоидного серебра.

Эффекты сверхрассеяния коротковолнового света в слоях можно компенсировать, если свет этот будет поглощаться в большей степени, чем свет длинноволновый. Мы уже говорили о том, что в многослойных цветных фотоматериалах изображение в верхнем слое неизбежно резче, а в нижнем — неизбежно менее резкое, поскольку свет, проникающий в средний слой рассеивается верхним слоем, а свет, доходящий до нижнего слоя, рассеивается верхним и средним слоями. Поэтому верхние слои цветных фотоматериалов изготавливаются с настолько низкой дисперсностью, насколько это возможно, но, несмотря на все усилия, в материалах с традиционной последовательностью слоев (синечувствительный — наверху, зеленочувствительный — посередине, красночувствительный — внизу) желтое красочное изображение (которое образуется в синечувствительном слое) всегда визуально резче, чем изображение пурпурное (образуется в зеленочувствительном слое), и тем более, чем изображение голубое.

В результате, к примеру, узкая белая полоса, лежащая на темном фоне, воспроизводится голубоватой.

Измерения MTF цветных фотоматериалов четко указывают на наличие описанных выше диффузных процессов, что хорошо видно по рис. 18.17: желтое красочное изображение обладает максимально высокой фотографической MTF, а голубое — самой низкой (за исключением низких пространственных частот).

Отметим, что на рис. 18.17 шкала MTF и шкала пространственных частот — логарифмические. Нетрудно догадаться, что логарифмированная шкала MTF-значений визуально равномернее, нежели линейная. Таким образом, смысл логарифмирования шкалы пространственных частот состоит в том, чтобы «переориентировать» последнюю на границы между стимулами низких пространственных частот, к которым зрение человека чувствительнее всего, тогда как высоким частотам, где зрительный отклик минимален, логарифмированная шкала уделяет меньше всего «внимания». При этом, однако, логарифмирование не учитывает тот факт, что зрение человека дает некоторый (хотя и малый) отклик на границы между стимулами особо низких пространственных частот (см. рис. 18.16).

18.16 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ВИЗУАЛЬНОЙ РЕЗКОСТИ ЦВЕТНЫХ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ

18.16.1 Изменение последовательности светочувствительных слоев

Коль скоро визуальная резкость красочных изображений, образованных слоями цветного фотоматериала, неодинакова, то порой появляется возможность улучшить общую визуальную резкость изображения за счет выбора нетрадиционной последовательности слоев: именно поэтому в некоторых цветных дубль-пленках[1] зеленочувствительный слой, образующий magenta-изображение, поливается сверху, а синечувствительный, образующий yellow-изображение, — снизу (см. раздел 12.11). Поскольку у magenta-изображения вклад в общую фотографическую MTF-пленки максимальный, а у yellow-изображения — минимальный, то желательно, чтобы magenta-изображение было как можно резче.

Зеленочувствительный слой (magenta-слой) фотопленок, экспонируемых фотоаппаратом, также можно полить сверху, а синечувствительный (yellow-слой) — снизу. Последнее осуществимо путем применения сверхвысокочувствительного «синего» слоя, который экспонируется даже несмотря на то, что поверх всех слоев лежит фильтровый желтый слой (Moser и Fritz, 1975).

18.16.2 Уменьшение толщины красочных изображений

Чтобы повысить коэффициент фотографической MTF некоторые слои изготавливаются сверхтонкими. Общая толщина высушенной цветной пленки (которая может состоять из 10 и даже более слоев) сегодня достигает порядка 5—10 μm (Meyer, 1965; Engel, 1968), что хорошо видно по рис. 18.5, тогда как в 40-е годы прошлого века, то есть на заре массовой цветной фотографии, она была в пять раз выше (Thirtle и Zwick,

---

[1] Дубль-пленки позволяют применять низкочувствительные хлорсеребряные или хлоробромосеребряные эмульсии, исходная чувствительность которых сдвинута в сторону ультрафиолета.



Рис. 18.16 MTF зрительной системы человека.

1979). Понятно, что чем тоньше слои, тем выше визуальная резкость красочных изображений (особенно нижних).[1]

18.16.3 Применение светопоглощающих красителей

При производстве дубль-пленок и фотобумаг (фотографическая чувствительность которых не столь значима) в каждый светочувствительный слой вводится специальный краситель (либо закладывается на границе между слоями), поглощающий свет тех длин волн, к которым чувствителен данный слой, то есть: в зеленочувствительный слой вводится magenta-краситель, в красночувствительный — cyan, в синечувствительный — yellow. Наличие *поглощающих красителей* снижает интенсивность света, рассеянного внутри слоев, в результате чего визуальная резкость будущих красочных изображений растет (Hanson и Kisner, 1953; Bello, Groet, Hanson, Osborne и Zwick, 1957; Davies, 1970).

18.16.4 Буферные слои

В результате т.н. *латеральной* (*боковой*) *диффузии* молекул окисленного проявляющего вещества или в результате затянувшегося промежуточного этапа реакции сочетания с краскообразующей компонентой визуальная резкость красочных изображений может снизиться: когда паразитная диффузия проявляющего вещества идет вер-

---

[1] Покрытие подложки особо тонкими слоями требует специальной техники производства фотоматериалов: жидкие эмульсии, выдавливаемые из неких емкостей через узкие щели, формируют влажный многослойный «сэндвич», сползающий на движущуюся подложку (а мениск, образующийся в точке касания, обеспечивает отсос воздуха) (Hanson, 1977 и 1981).

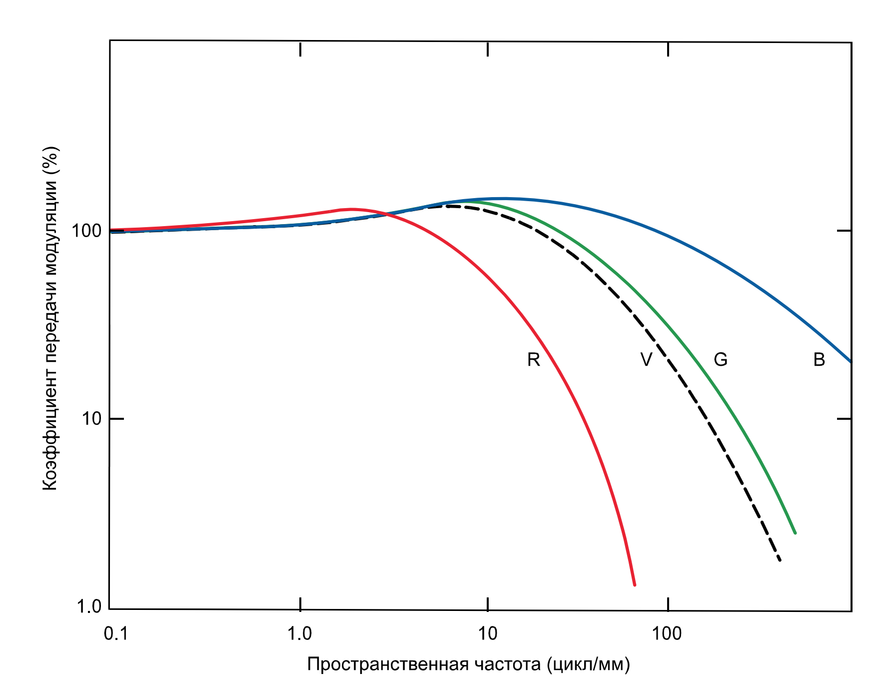


Рис. 18.17 Фотографические функции передачи модуляции многослойной цветной фотопленки, измеренные за красным (R-кривая), зеленым (G-кривая), синим (B-кривая) и «визуальным» (V-кривая) фильтрами. Последняя построена с помощью микроденситометра, спектральный отклик которого эквивалентен функции фотопической световой эффективности. Мы видим, что фотографическая MTF, измеренная за синим фильтром, в основном зависит от верхнего, то есть — синечувствительного слоя фотоматериала, образующего yellow-красочное изображение, которое является визуально наиболее резким, а также, что фотографическая MTF, измеренная за красным фильтром, сильнее всего зависит от нижнего — красночувствительного слоя, образующего cyan-красочное изображение, обладающего самой низкой визуальной резкостью. Фотографическая MTF, измеренная за зеленым фильтром, зависит в основном от промежуточного, зеленочувствительного, слоя, образующего magenta-красочное изображение, обладающего промежуточным уровнем визуальной резкости. Заметим, что фотографическая MTF magenta-изображения очень схожа с фотографической MTF, измеренной за «визуальным» фильтром, имитирующим зрительный яркостный отклик.

Все четыре графика даны в логарифмических шкалах.

тикально, то есть от одного слоя к другому, то возникает т.н. *паразитное краскообразование* (т.е. образование красителя в «чужих» слоях). Предотвратить сие можно за счет специальных химических соединений, размещаемых между фотографическими слоями и препятствующими паразитной диффузии (Thirtle и Zwick, 1964).

18.16.5 Усиление краевых эффектов

Еще одним и очень важным приемом, позволяющим усилить ощущение визуальной резкости, является усиление краевых (пограничных) эффектов, что позволяет воспроизводить мелкие детали изображения с относительно бóльшим контрастом, чем детали крупные. Любопытно, что с помощью усиления краевых эффектов можно получить фотографический коэффициент передачи модуляции, превышающий 100% (см. рис. 18.17).

Краевые эффекты возникают, в частности, при проявлении в участках изображения, лежащих рядом с непроявленной областью, то есть возле края последней, когда

вещества — продукты проявления, начинают латеральную (боковую) диффузию. В результате возле границы проявленной области с непроявленной начинает расти оптическая плотность, поскольку продукты проявления его же и активизируют. И наоборот: оптическая плотность малопроявленной области может упасть возле границы с сильно проявленной, потому что диффундировавшие из нее продукты проявления начинают тормозить последнее.

На рис. 18.18 даны несколько примеров т.н. *микроденситометрической трассировки* краев между линиями разной толщины в проявленной пленке. Мы видим, что «ушки» повышенной оптической плотности возникают на краях широких линий и что у узких линий эти «ушки» сливаются между собой, образуя единую линию повышенной оптической плотности.

Отметим, что вещества — продукты проявления могут диффундировать в соседние слои фотоматериала и увеличивать при этом свою концентрацию у границ элементов изображения, усиливая тем самым краевые эффекты и повышая величину визуальной резкости изображения.

Краскообразующие компоненты, выделяющие вещества — ингибиторы проявления (DIR-компоненты) (см. раздел 17.11), создают весьма эффективный механизм провокации краевых эффектов. Поскольку вещество-ингибитор выделяется из краскообразующих компонент в процессе реакции сочетания этой компоненты с проявляющим веществом, определенное количество ингибитора диффундирует из зоны проявления, и возле края проявляемого элемента изображения устанавливается отрицательный градиент концентрации ингибитора. Следствием является то, что возле края проявляющегося элемента краскообразование идет активнее, нежели в центре. Плюс к тому ингибитор, диффундировавший в соседние, менее экспонированные (и, следовательно, не столь интенсивно проявляемые) элементы скрытого изображения, тормозит проявление возле краев этих элементов (Barr, Thirtle и Vittum, 1969).

18.16.6 Создание рельефных изображений

Шестой способ повышения визуальной резкости цветных изображений состоит в том, что цветная фотопленка в процессе проявления подвергается физической деформации, в частности за счет разной степени задубливания желатина в проявленных и менее проявленных участках изображения, что ведет к образованию некоего рельефа на поверхности пленки. Данный прием позволяет усилить визуальную резкость изображения, когда пленка рассматривается в зеркальном свете, то есть с помощью проектора.

По описанной причине оценка визуальной резкости пленок, в которых воспроизведен обсуждаемый эффект, должна всегда проводиться с помощью той оптической системы, что по геометрии схожа с фактической оптической системой (причем даже несмотря на то, что красочные изображения сами по себе могут оказаться несветорассеивающими).

Рельефные структуры на поверхности пленки иногда возникают в процессе отбеливания, особенно когда в качестве окисляющего агента используются дихроматы. Растворы на основе ферроцианида, как правило, не дают рельефных эффектов.

Если рельефный компонент изображения оказывается чрезмерен, то возникают визуально некомфортные гало-эффекты (эффекты ореолов) (Bello и Zwick, 1959). Плюс к тому, когда усиливается задубливание вокруг отдельных зерен изображения, иногда отмечается рост гранулярности последнего (Zwick, 1962).

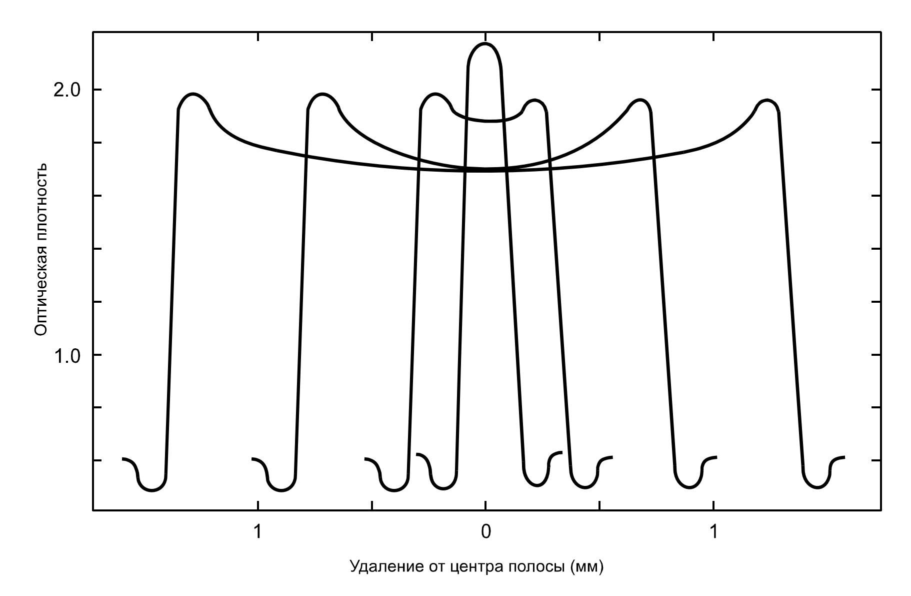


Рис. 18.18 Результаты микроденситометрической трассировки линий разной толщины (оптическая плотность дана как функция удаления от центра полосы). У широких линий участки повышенных и пониженных оптических плотностей отмечаются только возле краев. У тонких эти участки сливаются между собой, образуя линии повышенной оптической плотности.

Если поверхность пленки слишком гладкая, то при контактной печати на пленке с аналогично гладкой поверхностью могут появиться т.н. *кольца Ньютона* (кольца интерференции). Избежать появления интерференционных колец можно покрыв обе пленки специальным рифлирующим веществом, либо одну из них тонким слоем жидкости, имеющей тот же показатель преломления, что у желатина (Zwick, 1962). Последнее именуется *иммерсионной печатью*, которая ко всему прочему позволяет снизить визуальную различимость царапин, пылинок и прочей грязи на поверхности пленок (Stott, Cummins и Breton, 1957; Turner, Grant и Breton, 1957).

18.16.7 Внедрение противоореольных слоев

Седьмой метод повышения визуальной резкости цветных изображений (находящий применение в том числе и в черно-белой фотографии) — это внедрение специального противоореольного слоя, поглощающего свет, отражаемый нижней поверхностью подложки пленки. Этот слой выступает либо в роли тонкого защитного слоя (покрывает пленку со стороны подложки), содержащего красители или пигменты (в частности, сажу), либо в роли слоя восстановленного серебра, политого между подложкой пленки и нижним светочувствительным слоем. Понятно, что в обоих случаях абсорбент в процессе обработки фотоматериала удаляется, дабы изображение не оказалось неприемлемо темным (см. разделы 17.9 и 18.3) (см. рис. 18.10).

18.16.8 Контроль экранной поверхности

Еще один фактор, который может оказать влияние на визуальную резкость фотоизображений, — это фактура проекционного экрана: гладкий матово-белый экран, вероятнее всего, не понизит резкости проектируемого изображения, но шершавая, зер-

нистая или полосчатая поверхности с близкого просмотрового расстояния ощутимо снижают визуальную резкость этого изображения.

* * *

См. рис. 18.8 как пример высокорезкого изображения, полученного на современной цветной пленке.

* * *

В заключение раздела отметим, что сочетанное влияние визуальной резкости и зернистости на качество цветных отпечатков детально изучено Бартлесоном (Bartleson, 1981 и 1985).

18.17 КРАПЧАТОСТЬ ФОТОБУМАГ

Шершавость подложки фотобумаг может вызвать ощущение легкой крапчатости изображения. Коль скоро крапчатость желтого красочного изображения намного менее заметна, чем крапчатость голубого или пурпурного, то порой имеет смысл вместо красночувствительного слоя (образующего голубой краситель) полить на подложку синечувствительный (образующий желтый краситель), а затем уже оставшиеся два слоя (см. рис. 18.10).

18.18 СТРУКТУРА ГИДРОТИПНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Цветофотографические системы, в которых на одной из стадий процесса водорастворимое красочное изображение (гидротипное изображение) переносится с одного носителя на другой (как, к примеру, в системе *Polarcolor*), могут выдавать результирующие изображения с очень низкой или даже нулевой гранулярностью, поскольку в процессе переноса возникает т.н. *латеральное смазывание* облаков красителей. Однако интенсивная латеральная диффузия последних понижает визуальную резкость изображений, и поэтому область применения систем, подобных *Polarcolor*, ограничивается ситуациями, не предполагающими какого-либо увеличения.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Barr, C.R., Thirtle, J.R., and Vittum, P.W., Phot. Sci. Eng., 13, 74 and 214 (1969).
Bartleson, C.J., J. Phot. Sci., 30, 33 (1981).
Bartleson, C.J., J. Phot. Sci., 33, 117 (1985).
Bello, H.J., and Zwick, D.M., Phot. Sci. Eng., 3, 221 (1959).
Bello, H.J., Groet, N.H., Hanson, W.T., Osborne, C.E., and Zwick, D.M., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 66, 205 (1957).
British Journal of Photography, Brit. J. Phot., 124, 950 (1977).
Crane, E.M., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 73, 643 (1964).
Crawley, G., Brit. J. Phot., 126, 340 (1979).
Dainty, J., and Shaw, R., Image Science, Academic Press, London (1976).
Davies, B.J., Brit. Kinematog. Sound Tel., 52, 118 (1970).
De Belder, M., and De Kerf, J., Phot. Sci. Eng., 11, 371 (1967).
De Palma, J.J., and Lowry, E.M., J. Opt. Soc. Amer., 52, 328 (1962).
Doerner, E.C., J. Opt. Soc. Amer., 52, 669 (1962).
Engel, C.E., Photography for the Scientist, p.58, Academic Press, London (1968).

Gendron, R.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 82, 1009 (1973).
Granger, E.M., and Cupery, K.N., Phot. Sci. Eng., 16, 221 (1972).
Hanson, W.T., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 90, 791 (1981).
Hanson, W.T., Phot. Sci. Eng., 21, 293 (1977).
Hanson, W.T., and Kisner, W.I., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 61, 681 (1953).
Happй, L.B., Basic Motion Picture Technology, p.309, Focal Press, London (1971).
Higgins, G.C., and Stultz, K.F., J. Opt. Soc. Amer., 49, 925 (1959).
Hunt, R.W.G., J. Roy. Television Soc., 11, 220 (1967).
Kennel, G.L., Sehlin, R.C., Reinking, F.R., Spakowsky, S.W., and Whittier, G.L., J. Soc. Pic. Tel. Eng., 91, 922 (1982).
Lamberts, R.L., J. Opt. Soc. Amer., 51, 982 (1961).
Lamberts, R.L., Applied Optics, 2, 273 (1963).
Lythgoe, R.J., Med. Res. Council Spec. Rep. Ser., No. 177 (1932).
Mannheim, L.A., Brit. J. Phot., 125, 430 (1978).
Maude, N., British Journal of Photography Annual, p. 143 (1980).
Mees, C.E.K., and James, T.H., The Theory of the Photographic Process, 3rd Edn., pp. 523–530, Macmillan, New York (1966).
Meyer, A., J. Phot. Sci., 13, 90 (1965): See Fig.1.
Meyers, M.B., and Dalton, P.J., Brit. J. Phot., 126, 832 (1979).
Mollon, J.D., and Bowmaker, J.K., Nature, 360, 677 (1992).
Morris, R.A., and Wait, D.H., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 80, 819 (1971).
Moser, J.S., and Fritz, N.L., Phot. Sci. Eng., 19, 243 (1975).
Norris, J.C., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 80, 30 (1971).
Ooue, S., J. Appl. Phys. (Japan), 29, 685 (1960).
Rotthaler, M., Brit. Kinematog. Sound Tel., 56, 51 (1974).
Sawyer, J.F., Photographic Image Quality, Oxford Symposium, The Royal Photographic Society, p. 222 (1980).
Schade, O.H., J. Opt. Soc. Amer., 46, 739 (1956).
Selwyn, E.W.H., Phot. J., 75, 571 (1935).
Selwyn, E.W.H., Phot. J., 79, 513 (1939).
Selwyn, E.W.H., Phot. J., 83, 227 (1943).
Selwyn, E.W.H., J. Phot. Sci., 7, 138 (1959).
Stott, J.G., Cummins, G.E., and Breton, H.E. J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 66, 607 (1957).
Stultz, K.F., and Zweig, H.J., J. Opt. Soc. Amer., 49, 693 (1959).
Thirtle, J.R., and Zwick, D.M., Encyclopedia of Chemical Technology, 5, 840 (1964).
Thirtle, J.R., and Zwick, D.M., Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd Edn., 6, 617, Wiley, New York (1979).
Turner, J.R., Grant, D.E., and Breton, H.E., J. Soc. Mot. Pic. Tel., 66, 612 (1957).
Verbrugghe, R., De Belder, M., and Langner, G., Phot. Sci. Eng., 11, 379 (1967).
Vervoort, A., and Stappaerts, H., Brit. Kinematog. Sound Tel., 72, 148 (1980).
Wall, F.J.B., and Steel, B.G., J. Phot. Sci., 12, 34 (1964).
Wheeler, L.J., Principles of Cinematography, 4th Edn., p. 308, Fountain Press, London, (1969).
Zwick, D.M., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 71, 15 (1962).
Zwick, D.M., J. Phot. Sci., 11, 269 (1963).
Zwick, D.M., Phot. Sci. Eng., 9, 145 (1965).
Zwick, D.M., Phot. Sci. Eng. 16, 345 (1972).
Zwick, D.M., and Brothers, D.L., Phot. Sci. Eng., 19, 235 (1975).

ЛИТЕРАТУРА

Dainty, J.C., and Shaw, R., Image Science, Academic Press, London (1974).

Kowaliski, P., Applied Photographic Theory, Wiley, New York (1972).

Lamberts, R.L., J. Opt. Soc. Amer., 49, 425 (1959).

Lamberts, R.L., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 9, 635 (1962).

Mees, C.E.K., and James T.H., The Theory of the Photographic Process, 4th Edn., Macmillan, New York (1977).

Thirtle, J.R., and Zwick, D.M., Encyclopedia of Chemical Technology, 3rd Edn., 6, 617, Wiley, New York (1979).

Часть третья

ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ

19 ПЕРЕДАЧА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИГНАЛОВ

19.1 ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Первый этап развития радиотехники увенчался появлением морзянки (сигнал которой впервые был передан в начале 20-х годов прошлого века) после чего развитие это застопорилось на аудиовещании и низкоскоростной передаче неподвижных изображений. Для того, чтобы наконец возможной стала передача изображений движущихся, потребовался еще один и довольно долгий период времени. Как ни странно, но методы, которые, в конечном итоге стали применяться для этих целей, были предложены еще неким Кэмпбеллом-Свинтоном в его удивительно прозорливой статье «Distant Electric Vision», опубликованной в одном из июньских номеров «Nature» за 1908 г. (Campbell-Swinton, 1908)[1]. Однако прежде чем пророчества ученого начали сбываться, продолжался активный поиск альтернативных способов решения данной задачи (Hawker, 1983).

Презентация первой работоспособной телевизионной системы состоялась в 1926 г., в Лондоне на Фрит-стрит, и была проведена неким Дж. Л. Бердом на 50-летнем юбилее Королевской научной ассоциации (Shiers, 1976). В бердовской системе сцена проецировалась на вращающийся диск (см. рис. 20.1): благодаря пакетам отверстий в этом диске свет, отраженный от объектов сцены, распределялся в виде некоей последовательности точек, образующей искривленные линии и воздействовал на фотоэлементы, выдававшие в ответ электрические сигналы. Кодирование информации о количестве света происходило путем изменения амплитуды этих сигналов. Закодированная информация передавалась затем по обычным (голосовым) телефонным проводам и на обычных радиовещательных частотах. Приемником изображение воспроизводилось путем управления интенсивностью свечения специальной неоновой лампы и просматривалось это изображение через такой же диск, с такими же отверстиями. Строк в системе было всего лишь 30, и поэтому четкость воспроизводимого изображения была очень низкой; частота кадров составляла 12.5 кадр/с, в результате чего экранная картинка неприятно дрожала.

В 1928 Берд смог показать цветные изображения, используя при этом метод последовательных кадров (см. раздел 3.2), в котором один за другим воспроизводились красный, зеленый и синий изображения. В том же 1928 г. была сконструирована некая альтернативная студийная система, основанная на принципе т.н. *бегущего луча*: сцена освещалась точечным источником, свет которого пробегал серию строк, а отраженный свет захватывался фотоэлементами.

Экспериментальное «немое» монохромное ТВ-вещание началось в Лондоне в 1929 г., «звук» добавили в 1930 г., открытое телевещание появилось в 1931, а к показу

---

[1] http://www.manhattanrarebooks-science.com/swinton.htm — *Прим. пер.*

кинолент по телевидению приступили в 1932 г. Отметим, что все перечисленное осуществлялось с 1932 по 1937 гг. силами BBC[1] (Bridgewater, 1977).

Стоит отметить, что низкая четкость и заметное мерцание при 30 строках и 12.5 кадрах в секунду являлись весьма слабым местом системы, и, в итоге, Берд изобрел телесистему в 240 строк при частоте 25 кадр/с, но, к сожалению, работать она смогла только в студийных условиях: к крупным сценам применялась обычная кинокамера, производившая фотографическую регистрацию сцены, после чего в течение 64 секунд кинопленку проявляли и сканировали. В отношении малых сцен использовался уже знакомый нам метод бегущего луча (Herbert, 1987 и 1990).

Тем временем в исследовательских лабораториях EMI[2] под руководством Дж. Д. Мак-Ги активно велась работа по внедрению бездисковых систем и систем, не требующих применения устройств механического сканирования (таких как бердовские зеркальные барабаны). В итоге, уйти от механического сканирования удалось благодаря тому, что:

— во-первых, научились-таки осуществлять телевизионный захват за счет сканирования специальной чувствительной поверхности электронным лучом в т.н. *передающей трубке*, изобретенной в 1928 г. В.К. Зворыкиным.[3]

— во-вторых, к тому времени уже существовало устройство (хоть и далекое от совершенства), позволявшее *воспроизводить* телевизионное изображение путем сканирования светоизлучающей поверхности опять же электронным лучом (электронно-лучевая трубка).

Позднее на базе электронно-сканирующих устройств команда EMI (но уже под руководством Исаака Шоенберга) разработала систему из 405 строк при частоте 25 кадров в секунду.

Итак, наступил момент испытаний, которые должны были показать, чья система (бердовская или EMI) лучше подходит широковещательному телевидению: в ноябре 1936 г., лондонское подразделение BBC начало передачи на базе обеих систем, но в разные дни. Моментально стало ясно, что будущее за EMI-системой, причем не только потому, что у нее было больше строк (и, следовательно, выше деталировка изображений), но еще и потому, что ее камеры оказались легче, мобильнее и могли не только легко перемещаться по студии, но и использоваться при внестудийных передачах. Бердовская 240-строчная система (использовавшаяся, напомним, либо в связке с кинокамерой, либо со сканирующей осветительной системой) оказалась громоздка и не-

---

1 BBC (British Broadcasting Corporation) — Британская радиовещательная корпорация, Би-би-си (радио- и телевещательная компания в Лондоне; находится под контролем правительства; ведёт передачи на всю страну и большинство стран мира; BBC 1 , BBC 2 , Radio 1 , Radio 2 , Radio 3 , Radio 4 , Radio 5 , Broadcasting House; Учреждена в 1927 как радиовещательная корпорация; телепередачи ведутся с 1936). — *Прим. пер.*

2 EMI (Electrical and Musical Industries) — «Электрикал энд мьюзикал индастриз» (крупная электротехническая компания; владеет дочерними компаниями «Морфи-Ричардз» [Morphy-Richards] и «Хиз мастерз войс» [His Master's Voice], производят радиоэлектронное оборудование и приборы, вычислительные устройства, бытовую радиотехнику и т.п. Основана в 1931. В 1979 слилась с «Торн электрикал индастриз» [Thorn Electrical Industries] под названием «Торн И-эм-айз» [Thorn EMI]). — *Прим. пер.*

3 Владимир Козьмич Зворыкин (1889-1982) — гениальный инженер и изобретатель. Родился в России, в 1918 эмигрировал, с 1919 в США. В 1931 создал иконоскоп первую передающую телевизионную трубку. Разрабатывал фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, электронные микроскопы и др. В. К. Зворыкина по праву называют «отцом телевидения». — *Прим. пер.*

поворотлива и, главное, ни при каких обстоятельствах не была пригодной к внестудийному вещанию. В итоге, эксплуатация системы Берда прекратилась в феврале 1937 г. (Birkinshaw, 1977).

Вплоть до начала второй мировой войны телесистема EMI активно использовалась для удовлетворения постоянно растущих запросов телестудий, а также при внестудийном вещании (отсчет которому ведется от коронации короля Англии Георга VI и Уимблдонского теннисного турнира, состоявшихся в 1937 г).

К 1939 г. уже действовало порядка 20000 телекомплексов, но дело застопорилось из-за разразившейся мировой войны. После войны первое регулярное государственное телевещание (с приемлемой четкостью передаваемого изображения) восстановилось в 1946 г. в Берлине — при этом использовалась система образца 1935 г. на 180 строк (Sidey, Longman, Glencross и Pilgrim, 1981).

Итак, разговор о современных телевизионных системах мы начнем со знакомства с основными требованиями, предъявляемыми к т.н. *широковещательным телевизионным системам стандартной четкости*.

19.2 ПОЛОСА ВЕЩАНИЯ

Начнем с того, что, к примеру, сигналы двух мощных радиостанций можно принимать без т.н. *паразитной интерференции* только тогда, когда частоты (длины волн) обеих станций сильно разнесены: аналогично и в телевидении — каждая телестанция должна работать в своем собственном частотном диапазоне или как обычно говорят «в своей полосе вещания». Однако, радиоспектр достаточно ограничен и телевидение должно считаться с требованиями радио, радиотелефонии, телеграфа, полицейской и военной связи, морской и авиа навигации, радиолокации и пр. Вместе с тем, телевидение по определению требует более широкой полосы, нежели радиовещание, и проблема поиска адекватного частотного диапазона для каждой станции выражена гораздо сильнее.

Важно помнить, что в цветном телевидении необходимо передавать не одно, а три изображения, то есть, мы говорим, что цветному телевидению нужна втрое бóльшая ширина полосы, нежели телевидению монохромному. В результате, проблемы т.н. *частотного фитинга без интерференции* становятся в полный рост. То есть, передаче полноцветных изображений необходима как можно более широкая полоса частот (к обеспечению чего в свое время прилагались огромные усилия).

Чтобы продолжить разговор о причинах того, почему телевидению, в частности цветному, требуется расширенная полоса вещания, дадим определение такого понятия как *несущая частота*:

⇨ Несущая частота — это частота электромагнитных колебаний, подвергаемых модуляции сигналами с целью передачи информации.

В самих колебаниях с несущей частотой не содержится информации, они лишь «несут» эту информацию.

Рассмотрим средневолновую станцию, несущая частота[1] которой равна, скажем,

---

[1] Единица частоты — герц (Гц), что равно 1 циклу в секунду. В радио и телевидении широко используются килогерцы (КГц) — 1000 циклов в секунду и мегагерцы (МГц) — 1000000 циклов в секунду.

1000 кГц (что соответствует длине волны примерно в 300 м)[1] и передающую звуковые сигналы двух видов: порядка 50 Гц (низкие) и порядка 5000 Гц (высокие). Модуляция мегагерцовой несущей сигналом с частотой в 50 Гц даст появление в радиоспектре т.н. *сигнала боковых частот* на 1000050 и 999950 Гц (соответствует длинам волн в 299.985 и 300.015 м), что крайне мало отличается от основной частоты в 1000000 Гц. Однако модуляция сигналом в 5000 Гц даст появление в радиоспектре сигнала боковых частот на 1005000 и 995000 Гц (что соответствует длинам волн в 298.6 и 301.5 м) и уже существенно отлично от частоты самоей несущей.

В телевидении количество требуемых модуляций в секунду много больше, чем максимально необходимое их количество в радиовещании. Давайте, к примеру, возьмем систему, работающую с 525 строками и при 30 полных кадрах в секунду. Количество строк ограничивает деталировку передаваемых изображений по вертикали сеткой из 525 черных и белых горизонтальных строк, то есть их 525×1/2 парами. Если система имеет точно такое же разрешение по горизонтальному направлению, то это значит, что воспроизводимое изображение будет состоять из 1/2×525×4/3 пар строк: коэффициент 4/3 введен дабы учесть тот факт, что традиционное телевизионное изображение не квадратное (формат кадра 4/3). Таким образом, каждая строка в системе может принять 1/2×525×4/3 полных модуляции: от черного через белый опять к черному (за один проход). Однако коль скоро мы имеем 525 строк развертки и 30 кадров в секунду, то число возможных модуляций в секунду будет равным:

$$1/2 \times 525 \times (4/3) \times 525 \times 30 = 5512500$$

или, приблизительно 5.5 МГц.

На практике, однако, вдобавок к передаче информации об изображении требуется передача специальной синхронизирующей информации, поэтому не все 525 строк и не все время развертки каждой строки приходятся собственно на изображение.

Простой расчет, приведенный выше, усложняется еще и тем фактом, что т.н. *дробление строк* ведет к снижению разрешения *пар* строк до 3/4 от половинного количества строк, то есть до 3/8 от их общего числа (коэффициент 3/4 — это т.н. *коэффициент Келла*). Следовательно, максимальная фактическая частота в данной системе может быть равной лишь примерно 4 МГц (Jesty, 1957).

Далее. Понятно, что телевизионные системы требуют передачи сигналов много бо́льших частот, чем в традиционном радиовещании и, поскольку частота модулирующего сигнала может намного превышать 5 МГц, частота несущих не может быть ниже 50 МГц (что соответствует длинам волн порядка 6 м).[2] Частоты типичных несущих волн даны в табл. 19.1.

Несущая с частотой 50 МГц, модулированная сигналами, превышающими по частоте 5 МГц, даст некоторый боковой сигнал, выходящий за рамки диапазона 40-55 МГц (соответствует длинам волн от 6.7 до 5.5 м). Чем выше требуемая деталиров-

---

1 Произведение частоты на длину волны всегда равно скорости распространения этой волны. В данном случае — скорости света в вакууме, то есть 3×10^8 м/с.

2 Кстати говоря, по этой причине радиовещательные сигналы могут быть переданы вокруг Земли, а телевизионные всегда ограничены радиусом примерно в 100 миль: дело в том, что сигналы 50 МГц-ового частотного диапазона не отражаются от ионосферы и могут удовлетворительно передаваться либо в радиусе действия передатчика, либо с помощью спутниковых ретрансляторов.

ТАБЛИЦА 19.1 Частоты несущих, используемые в широковещательном телевидении

Очень высокие частоты VHF (Very high Frequencies)	от	30	до	300 МГц
Ультравысокие частоты UHF (Ultra High Frequencies)	от	300	до	3000 МГц
Полоса I	от	41	до	68 МГц
Полоса II	от	87.5	до	100 МГц
Полоса III	от	162	до	230 МГц
Полоса IV	от	470	до	558 МГц
Полоса V	от	582	до	860 МГц

ка телеизображения, тем шире должна быть полоса сигнала и тем выше должна быть его максимальная частота (т.е. больше диапазон длин волн). Вычисления свидетельствуют, что максимальная частота модулирующего сигнала растет пропорционально квадрату числа строк развертки (что также пропорционально частоте кадров).

Итак, в США была принята система, построенная на 525 строках развертки при 30 кадрах в секунду; в Великобритании — система, имевшая 425 строк развертки при 25 кадрах в секунду и работавшая при максимальной частоте модулирующего сигнала в 3 МГц (эксплуатировалась вплоть до 1964 г., когда ей на смену пришла телесистема, построенная на 625 строках развертки при частоте 25 кадр/с и максимальной частоте модулирующего сигнала в 5.5 МГц). Отметим, что 625 строк развертки были приняты, в итоге, в качестве европейского телевизионного стандарта, в частности стандарта цветного телевидения.

Сегодня во всех странах цветной телепоказ ведется либо в 525, либо в 625 строк, за исключением т.н. *ТВЧ — телевидения высокой четкости* (см. раздел 19.16).

19.3 ЧЕРЕССТРОЧНАЯ РАЗВЁРТКА

Требуемый диапазон частот модулирующих сигналов, необходимый для эффективной работы описанных систем, очень высок, что диктует необходимость применения т.н. *чересстрочной развертки* или *интерлейсинга.*

Хорошо известно, что когда частота кадров низка, на экране возникает визуально дискомфортное мелькание. При этом в кинематографе, где используется частота 25 кадр/с и при которой в процессе показа свет обычно прерывается обтюратором единожды (реже дважды), результирующая частота мельканий составляет 50 (иногда даже 75) раз в секунду, что практически незаметно (см. раздел 12.12). В телевидении, однако, прерывание электронного луча в процессе сканирования изображения приводит к тому, что перестает восприниматься лишь *часть* изображения. Более того, прерывание светового потока, испускаемого электронно-лучевой трубкой, создает вариации фотометрической яркости *внутри* изображения, поскольку прерывание это возникает в разных точках экрана трубки и на разных этапах одного цикла т.н. *послесвечения люминофора*. Проще говоря, при телепоказе диапазон 25-30 кадр/с слишком низок для того, чтобы уйти от мелькания и, следовательно, необходимо повышение частоты кадров. При этом понятно, что передаче двойного числа изображений в секунду потребуется не менее чем двукратное увеличение полосы. Вот здесь и приходит на по-

мощь т.н. *чересстрочная развертка*, при которой частота мельканий удваивается без увеличения ширины полосы пропускания.

В изображении, подвергнутом чересстрочной развертке, электронный луч вначале продуцирует все нечетные строки изображения: первую, третью, пятую и т.д., а затем добавляет между ними четные. Участки изображения, образованные всеми четными, или всеми нечетными строками именуются *чересстрочными полукадрами* или просто — *полукадрами*. За счет чересстрочной развертки при частоте 25 кадр/с за секунду проходит 50 полукадров, и, хотя каждый из них состоит лишь из половинного количества строк, 50 полукадр/с (в контексте разговора об уходе от мелькания) будут столь же визуально эффективны, что и гипотетические 50 кадров за ту же секунду.

Отметим, что мелькания становятся заметнее по мере роста общей фотометрической яркости изображения, и одним из достоинств системы, работающей при кадровой частоте 30 кадр/с (60 полукадров в секунду) в сравнении с системой на 25 кадр/с (50 полукадров в секунду), является то, что первая позволяет работать на бóльших фотометрических яркостях без появления визуально дискомфортного мелькания.

Стоит сказать также, что чересстрочная развертка всегда использовалась в черно-белом телевидении, поэтому ее применение в телевидении цветном не дает дополнительной экономии полосы вещания.

19.4 ПЕРЕДАЧА НА ОДНОЙ БОКОВОЙ ПОЛОСЕ

Еще одним приемом, позволяющим сократить полосу телевещания, является передача сигналов только тех частот, которые равны или *больше* частоты несущей. Сигналы, частóты которых ниже частоты несущей, идентичны тем, что выше ее и, следовательно, в передаче по обеим т.н. *боковым полосам* нет необходимости, поскольку и та, и другая, несут всю полноту информации об изображении. Таким образом, большинство телестанций фильтруют бóльшую часть сигналов, частота которых ниже (или выше) частоты несущей и передают эти сигналы лишь на одной из двух возможных боковых полос. Последнее именуется «техникой передачи по одной боковой полосе» (либо «техникой ассиметричной передачи», либо «техникой остаточной передачи»). Следовательно, требуемая ширина полосы вещания в данном случае ограничена практически максимальной частотой модулирующего сигнала (что уже отмечалось в разделе 19.2) и не удваивает это значение.

Передача по одной боковой полосе всегда использовалась в монохромном телевидении, поэтому ее применение в телевидении цветном не дает дополнительной экономии полосы пропускания.

19.5 СИСТЕМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ПОКАДРОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ТРИХРОМАТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Простейшая система цветного телевидения представляла собой систему последовательной покадровой передачи трихроматических сигналов: перед объективом телекамеры быстро сменяли друг друга красный, зеленый и синий фильтры, размещенные на вращающемся диске, а перед трубкой телеприемника — синхронно двигались аналогичные (рис. 19.1).

Однако существуют как минимум три причины, по которым такая система не нашла применения в широковещательном телевидении:



Рис. 19.1 Принципиальная схема системы последовательной покадровой передачи трихроматических сигналов.

— первая состояла в том, что частота кадров, необходимая для ухода от мелькания и хроматического дробления изображения, оказывалась в три раза большей, чем в черно-белом телевидении, в результате чего черно-белые телеприемники (по крайней мере не подвергнутые специальной модификации) не могли принимать цветные передачи. То есть, имела место о *несовместимость* систем;

— вторая причина в том, что вращающееся фильтровое колесо представляло собой нежелательный конструкционный элемент. (Следует сказать, что использовались также и неподвижные фильтры в виде тонких красного, зеленого и синего стрипов, перед которыми вибрировал линзово-растровый экран: на сетчатку глаз наблюдателей в единицу времени воздействовал только один из кардинальных стимулов, но смена этих стимулов происходила в очень быстрой последовательности.)[1]

— третья причина состояла в том, что коль скоро в единицу времени должно было передаваться в три раза больше визуальной информации, чем в монохромном телевидении, требовалась втрое бóльшая полоса рабочих частот, к примеру: системе с кадровой частотой 30 кадр/с, нужно было за секунду «прогнать» 90 кардинальных трихроматических изображений (последние обычно именуются *кадрами*). При помощи чересстрочной развертки сие превращается в: 30 изображений, 90 кадров и 180 полукадров в секунду. Такая частота полукадров позволяет уйти от мелькания фильтрового колеса, за исключением изображений очень быстро движущихся объектов, у которых неизбежно появляется паразитный хроматический контур (особенно когда объекты эти ярко окрашены).

Отметим, что чересстрочная развертка никак не влияет на максимальную частоту модулирующего сигнала, когда скорость смещения электронного пучка по каждой из строк неизменна. Следовательно, частоты модулирующих сигналов в системах последовательных полукадров при частоте этих полукадров 180 полукадр/с те же, что и у цветных систем, передающих 90 цветных кадр/с, но не использующих при этом чересстрочной развертки (и при этом в три раза выше, чем у черно-белых систем, работающих на 30 кадр/с [60 полукадр/с]).

Итак, необходимость в подъеме частот модулирующих сигналов до 15 МГц — очевидна, и это значит, что количество станций цветного телевещания, способных работать в рамках данного диапазона длин волн, сокращается до одной трети от станций ве-

1 То есть, превышающей порог мерцания — *Прим. пер.*

щания монохромного. По описанной причине, а также по причине несовместимости систем высокой частоты кадров с черно-белыми телеприемниками, простые цветные телевизионные системы последовательных полукадров не прижились в массовом телевещании. Вместе с тем, такие системы могли дать высокое качество передаваемых изображений при сравнительно простых оборудовании и методах его использования, и поэтому в околотелевизионных областях системы последовательных полукадров находили-таки свое применение, к примеру: они использовались при позитивной визуализации изображений, зафиксированных на негативных пленках, имитируя при этом результат печати с этих пленок (см. разделы 16.2 и 16.3).

В широковещательном телевидении обсуждаемые системы действовали в очень короткий период с 1950 по 1951 г., когда проект, предложенный CBS[1], был одобрен Федеральной комиссией по связи США (FCC)[2]: 144 полукадра в секунду при 405 строках развертки и только 2 МГц полосы на каждое из трех изображений (весьма низкого разрешения, разумеется), т.е. общая ширина полосы — 6 МГц. Однако из соображений безопасности в 1951 г. использование телекомплекса было прекращено и в дальнейшем в США вступила в строй принципиально иная система (см. далее).

19.6 РЕДУКЦИЯ СИНЕГО КАНАЛА

Выше мы рассмотрели ряд приемов, позволяющих уменьшить ширину полосы частот, необходимой цветному телевидению, и теперь обратимся к еще одному способу экономии этой полосы — методу *редукции синего канала.*

Известно, что человеческое зрение гораздо лучше распознает мелкие длинноволновые (красные) и средневолновые (зеленые) стимулы, чем коротковолновые (синие). Однако в цветном телевидении передаче мелких деталей изображения необходимы модулирующие сигналы высоких частот. К примеру, передача изображения ствола толстого черного дерева на фоне белого неба приведет к тому, что всякий раз как сканирующий электронный луч пройдет через этот ствол, возникнут единичные модуляции по каждому из кардинальных стимулов на одну строку в одном изображении, то есть: в системе на 525 строк и при 30 кадрах в секунду — 15750 раз в секунду.[3]

Вместе с тем, изображение лесной опушки, скажем из 200 деревьев, приведет к 200 модуляциям сканирующего луча и, следовательно, к частоте в 3150000 МГц. Однако, коль скоро с обычного просмотрового расстояния человеческое зрение в «синем» кардинальном изображении не способно различить 200 полос, то нет необходимости передавать все 200 по синему каналу. То есть, специальный высокочастотный фильтр может отсечь все сигналы, частота которых выше той, что обеспечивает различимость деталей в синем кардинальном изображении с нормального просмотрового расстояния.

---

[1] CBS (Columbia Broadcasting System) — Си-Би-Эс (одна из трёх крупнейших радиотелевещательных компаний США). — *Прим. пер.*

[2] FCC (Federal Communications Commission) — Федеральная комиссия по связи (ФКС) Независимая федеральная комиссия [independent regulatory commission]; создана в 1934 по Закону о федеральных средствах связи [Federal Communications Act of 1934] и состоит из пяти человек. Регулирует работу таких видов связи, как радио, телевидение, телеграф, телефон и кабельная связь и выдает лицензии на их деятельность. — *Прим. пер.*

[3] На фоне этого неизбежно возникают т.н. *высшие гармоники*, которые, однако, не портят общей картины.

С помощью метода редукции синего канала ширину его полосы можно сократить от 5 МГц до 1 МГц.

Отметим, что редукция синего канала неэффективна в системах последовательных полукадров, поскольку даже когда синее кардинальное изображение передается по сокращенной полосе, сканирование красного и зеленого кардинальных изображений будет по-прежнему занимать по одной трети времени.

19.7 РЕДУКЦИЯ ПОЛОСЫ

Способность зрения различать мелкие детали по большей части зависит от разности фотометрических яркостей между элементами изображения и значительно в меньшей степени от *хроматического* контраста между этими элементами. К примеру, визуальная различимость белых букв на темно-сером фоне (когда они рассматриваются с определенного расстояния), повысится не сильно, если к яркостному контрасту между буквами и фоном добавить контраст хроматический — скажем, буквы сделать желтыми, лежащими на темно-синем фоне (или, к примеру, оранжевыми на темно-зеленом) — имея одинаковые яркостные отличия от этого фона, они едва ли станут выглядеть светлее. Объяснением сказанному является то (см. раздел 18.7), что ахроматический канал зрения подвержен влиянию колбочек всех трех типов, и мы говорим, что его разрешающая способность соответствует диаметру одной колбочки. Однако возникновение т.*н. цветоразностных (оппонентных) сигналов зрения* требует участия колбочек как минимум двух типов (следовательно, как минимум двух колбочек), при этом значимым обычно оказывается сигнал от четырех колбочек (при их случайном распределении) (Mollon и Bowmaker, 1992), и поэтому говорят, что разрешение цветоразностного сигнала соответствует диаметру группы из четырех колбочек (Hunt, 1967).

Сказанное выше указывает на то, что информацию в цветном телевизионном изображении можно разделить на яркостную и хроматическую составляющие, но при этом только яркостная информация требует передачи с высоким разрешением (в результате чего ширину полосы можно уменьшить, транслируя хроматическую информацию при уменьшенном разрешении). Сказанное целиком подтверждается практикой и дает замечательный эффект.

19.7.1 Яркостный и цветоразностный сигналы

Поскольку три электрических сигнала телекамеры — E_R, E_G, E_B (обычно выражаемые в вольтах), по каждой точке изображения пропорциональны их трихроматическим составляющим (R, G, B) и зависят от спектральной чувствительности трех каналов телекамеры, то фотометрическая яркость (L) каждой точки изображения равна:

$$L = L_R R + L_G G + L_B B$$

где L_R, L_G и L_B — фотометрические яркости единичных количеств красного, зеленого и синего кардинальных стимулов. Таким образом, вполне можно воспроизвести электрический сигнал, E_L, который будет пропорционален фотометрической яркости, L, воспроизводимого стимула и, соответственно, сумме пропорций сигналов E_R, E_G, E_B. Допустив при этом постоянство пропорциональности между электрическими и оптическими сигналами по всем трем каналам телесистемы, получаем:

$$E_L = L_R E_R + L_G E_G + L_B E_B$$

Далее. Если три переданных сигнала представляют собой не E_R, E_G, E_B, а, E_L и каких-либо два других сигнала, скажем E_R и E_B, то E_L-сигнал можно передавать в широком диапазоне частот, а E_R и E_B — в узком. Однако в этом случае приемник должен будет *восстановить* E_G-сигнал, необходимый для конечной трихроматической визуализации изображения с помощью операции:

$$E_G = \frac{1}{L_G} E_L - \frac{L_R}{L_G} E_R - \frac{L_B}{L_G} E_B$$

По ее выполнении (и при условии, что два цветовых стимула, формируют некий паттерн такой мелкой деталировки, что хроматическое отличие между этими стимулами не передаваемо за счет E_R- и E_B-сигналов, но яркостное отличие при этом успешно передано с помощью сигнала E_L) приемник воспроизведет стимулы с цветностями, равными средней цветности исходных двух стимулов, но с яркостными отличиями, продуцированными E_L-сигналом. В итоге, мы получим корректные фотометрические яркости элементов изображения.

Предположим теперь, что истинные сигналы E_R и E_B по некоей области изображения вследствие усреднения цветностей, искажены до $E_R + A$ и $E_B + B$. Результирующие сигналы визуализации будут в этом случае изменены до:

$$E_{RM} = E_R + A$$
$$E_{GM} = \frac{1}{L_G} E_L - \frac{L_R}{L_G}\left(E_R + A\right) - \frac{L_B}{L_G}\left(E_B + B\right),$$
$$E_{BM} = E_B + B$$

а фотометрическая яркость этой области окажется пропорциональной:

$$\begin{aligned} &L_R E_{RM} + L_G E_{GM} + L_B E_{BM} \\ &= L_R\left(E_R + A\right) + E_L - L_R\left(E_R + A\right) - L_B\left(E_B + B\right) + L_B\left(E_B + B\right) \\ &= E_L \end{aligned}$$

Итак, понятно, что фотометрическая яркость воспроизводимого стимула будет той же, что суммарная яркость неизмененных сигналов E_R и E_B и, следовательно, стимул несмотря на ошибки по цветности, будет воспроизведен с верной фотометрической яркостью. Сие есть очень важный и значимый результат, именуемый принципом *постоянства фотометрической яркости*.

19.7.2 Преимущества технологии яркостного и цветоразностных сигналов

Было выявлено также, что с помощью раздельной передачи яркостного сигнала высокого разрешения и цветоразностных (хроматических) сигналов низкого разрешения можно добиться очень серьезной экономии частотной полосы. Если, положим, в некоей системе яркостный сигнал имеет ширину полосы, равную b, то остав-

шиеся два сигнала потребуют всего лишь $1/4b$ каждый, в сумме занимая $1/2b$ (Hunt, 1967), то есть вместо $3b$, которые необходимы системе последовательных полукадров (см. рис. 19.2). Более того, возможна и дальнейшая редукция полосы, при которой два сигнала требуют много меньшей ширины полосы, чем третий (что будет обсуждаться в разделах 19.9 и 19.11). Таким образом, системы, использующие один яркостный и два хроматических сигнала, по степени экономии полосы частот радикально выигрывают перед системами, построенными на передаче трихроматических (кардинальных) сигналов.

У обсуждаемых систем есть еще два важных преимущества, обязанных применению отдельного яркостного сигнала:

— во-первых, модифицирующие сигналы A и B, о которых речь шла выше, могут возникнуть из разных источников, и, следовательно, если, к примеру, E_R- и E_B-сигналы подвержены интерференции, то они не окажут влияния на яркостный компонент воспроизводимых стимулов. Сие замечательно, поскольку зрение более чувствительно к изменениям фотометрической яркости стимулов, нежели их цветности (кстати говоря, принцип, на котором основана работа фликкерных фотометров), а именно: обнаружено, что зрение толерантно примерно к в 2.5 раза большему «шуму» в хроматических каналах системы, нежели в яркостном. В целом, E_L-сигнал тоже подвержен интерференции, однако такой же ее уровень в E_R- и E_B-сигналах не создает визуальных проблем.

— во-вторых, один из трех передаваемых сигналов, будучи сигналом яркостным, может весьма эффективно использоваться при воспроизведении монохромных изображений на черно-белых телеприемниках; при этом, правда, необходимо, чтобы приемники эти игнорировали сигналы хроматические (что требуется при создании монохромных версий цветных телепередач). Следовательно, использование яркостного сигнала весьма и весьма способствует обеспечению *совместимости* между цветными и черно-белыми телесистемами.

19.7.3 Отрицательные величины

Несмотря на то, что алгебраические построения указывают на возможность всегда получать корректное значение E_L (причем даже тогда, когда E_R- и E_B-сигналы несут в себе погрешности), сие оказывается неверным, если возникают отрицательные значения E_{GM}: телеприемник не может выдать отрицательное количество зеленого кардинального стимула. Коль скоро видоизмененный «зеленый» сигнал, E_{GM}, вычисляется по формуле:

$$E_{GM} = \frac{1}{L_G} E_L - \frac{L_R}{L_G}\left(E_R + A\right) - \frac{L_B}{L_G}\left(E_B + B\right),$$

то, когда положительные величины «A» и «B» достаточно велики, значение E_{GM} может оказаться отрицательным. Такое, к примеру, может произойти при попытке воспроизвести пурпурные стимулы высокой колориметрической чистоты: высокочистые пурпурные уравниваются смесью лишь красного и синего кардинальных стимулов (то есть $E_G = 0$), то есть для таких стимулов:

$$E_G = 0 = \frac{1}{L_G} E_L - \frac{L_R}{L_G} E_R - \frac{L_B}{L_G} E_B$$



Рис. 19.2 Визуализация телеприемником различных PAL-сигналов (см. разделы 22.6 и 22.8): *a* — только яркостный сигнал; *b* — только цветоразностные сигналы $E'_R - E'_Y$ и $E'_B - E'_Y$; *c* — только $E'_R - E'_Y$-сигнал; *d* — только $E'_B - E'_Y$-сигнал; *e* — только яркостный и $E'_R - E'_Y$-сигналы; *f* — только яркостный и $E'_B - E'_Y$-сигналы; *g* — полный комплект сигналов.

Когда яркостный сигнал отсутствует, экран имеет равномерную фотометрическую яркость, благодаря чему появляется возможность увидеть результат визуализации только цветоразностных сигналов. Цветоразностные сигналы занимают четверть полосы и четверть вертикального разрешения яркостного сигнала, но неизбежное снижение хроматического разрешения становится заметным толко в отсутствие яркостного сигнала (см. раздел 19.7).

Слайды любезно предоставлены Управлением независимого телевидения Великобритании.

и, следовательно:

$$E_{GM} = -\frac{L_R}{L_G} A - \frac{L_B}{L_G} B$$

Предположим теперь, что имеется некий мелкий паттерн светлых и темных высокочистых пурпурных стимулов одинаковой цветности. E_R- и E_B-сигналы будут усреднены, и по светлым областям изображения значения E_{RM} и E_{BM} окажутся меньше, чем E_R и E_B. Следовательно, A и B отрицательны, а значение E_{GM}, соответственно, положительно. В результате, интересующая нас область будет воспроизведена с несколько большей фотометрической яркостью, чем необходима для корректной телерепродукции.

У темных областей E_{RM} и E_{BM} окажутся больше, чем E_R и E_B, то есть A и B будут положительны, делая E_{GM} отрицательным. Телеприемник, как уже было сказано, не может воспроизвести зеленый кардинальный стимул в отрицательном количестве, необходимом для компенсации избыточной фотометрической яркости стимула результирующего, и фотометрическая яркость темной части паттерна окажется чересчур высокой.

Отметим, что погрешности такого рода возможны лишь в тех паттернах, где зеленый сигнал очень мал (таких, в частности, как высоконасыщенные пурпурные), и где яркостная разница между элементами паттерна достаточно велика.

19.8 ЦВЕТОРАЗНОСТНЫЕ СИГНАЛЫ

Как уже говорилось выше, существует определенный резон в том, чтобы вместо трансляции сигналов E_L, E_R и E_B, яркостный сигнал сопроводить двумя *цветоразностными*, в частности $E_R - E_L$ и $E_B - E_L$; приемник же затем вполне в состоянии восстановить «зеленый» сигнал $E_G - E_L$, выполнив операцию:

$$E_G - E_L = \frac{1 - L_R - L_G - L_B}{L_G} E_L - \frac{L_R}{L_G}\left(E_R - E_L\right) - \frac{L_B}{L_G}\left(E_B - E_L\right)$$

Однако положительный эффект от цветоразностных сигналов в полной мере проявляет себя только тогда, когда яркостный сигнал строится из E_R-, E_G- и E_B сигналов, то есть, равен:

$$lE_R + mE_G + nE_B$$

где:

$$l = L_R / \left(L_R + L_G + L_B\right)$$

$$m = L_G / \left(L_R + L_G + L_B\right)$$

$$n = L_R / \left(L_R + L_G + L_B\right)$$

то есть:

$$l + m + n = 1.0$$

Дабы в дальнейшем отличать новый яркостный сигнал от E_L, мы обозначим первый как E_Y (подстрочный индекс «Y» — это Y-ось координатной системы CIE XYZ). Отметим, что E_Y по-прежнему остается подлинной мерой фотометрической яркости воспроизводимых стимулов, но выражаемой в единицах, численное значение которых в $(L_R + L_G + L_B)$ раз больше, чем у E_L.

Цветоразностными сигналами теперь будут $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$, и приемник может восстановить сигнал $E_G - E_Y$, выполнив операцию:

$$E_G - E_Y = -\frac{l}{m}\left(E_R - E_Y\right) - \frac{n}{m}\left(E_B - E_Y\right)$$

(до которого упрощается выражение для $E_G - E_L$, когда E_Y, l, m и n заменены на E_L, L_R, L_G, и L_B). Эта операция заметно проще, чем восстановление $E_G - E_L$-сигнала, но главное ее значение в том, что коль скоро задействуются только два сигнала низкого разрешения ($E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$), схема смешения низкочастотных откликов, используемая при этой операции, ощутимо упрощает устройство и снижает стоимость телеприемника. Три передаваемых сигнала представляют собой в этом случае высокодеталированный яркостный сигнал «E_Y» и два недеталированных цветоразностных сигнала — «$E_R - E_Y$» и «$E_B - E_Y$» (см. рис. 19.3).

В телеприемнике E_Y-сигнал высокого разрешения можно добавить теперь ко всем трем сигналам $E_R - E_Y$, $E_G - E_Y$ и $E_B - E_Y$, что требуется для получения необходимых «кардинальных» сигналов визуализации E_R, E_G и E_B. Одним из удобных путей выполнения сего с помощью электронно-лучевой трубки является применение трех цветоразностных сигналов низкого разрешения ($E_R - E_Y$, $E_G - E_Y$ и $E_B - E_Y$) к модуляторам электронных пушек трубки и аналогичного яркостного сигнала высокого разрешения (E_Y) к их трем катодам (см. раздел 21.1).

У идеи применения цветоразностных сигналов есть ряд дополнительных преимуществ, которые, однако, проявляют себя лишь тогда, когда соблюдено еще одно условие:

⇨ относительные чувствительности трех каналов телекамеры должны быть таковы, что в ответ на белые, серые и черные стимулы сцены $E_R = E_G = E_B$.

Поскольку $l + m + n = 1$, а $E_Y = lE_R + mE_G + nE_B$, то из этого следует, что по белым, серым и черным стимулам сцены $E_R = E_G = E_B = E_Y$, и, разумеется, что цветоразностный сигнал по этим стимулам (то есть, $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$) равен нулю. Отсюда же следует еще ряд положительных моментов:

— во-первых, вариации относительной мощности трех сигналов E_Y, $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$ не влияют на хроматический баланс серой шкалы воспроизводимого изображения;

— во-вторых, поскольку стимулы большинства сцен, как правило, обладают низ-

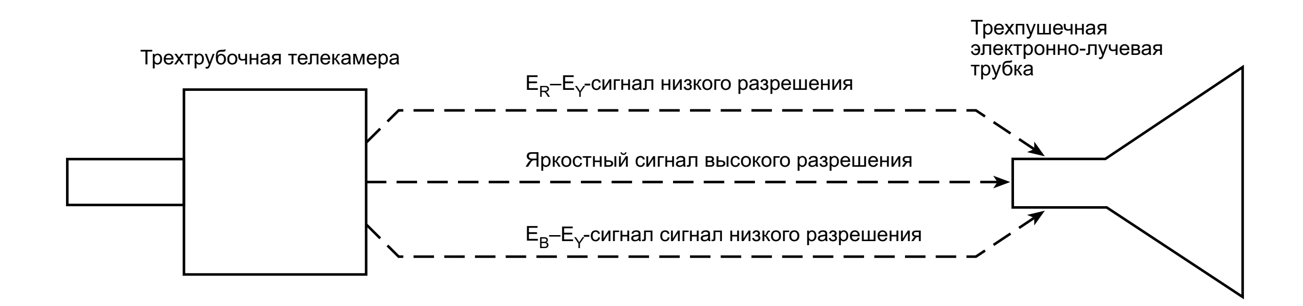


Рис. 19.3 Принципиальная схема системы яркостного сигнала высокого разрешения и цветоразностных сигналов низкого разрешения.

кой колориметрической чистотой, снижается необходимость в передаче какой-либо информации дополнительной к той, что несет в себе E_Y-сигнал и, следовательно, т.н. *перекрестные помехи* (которые являются следствием интерференции между цветоразностными и яркостным сигналами) в т.н. *системах частотной компрессии* (см. ниже) — минимальны.

Наконец отметим, что в тех ситуациях, в которых задействованы цветоразностные сигналы, примени́м принцип постоянства фотометрической яркости: как уже было сказано выше, сие можно продемонстрировать вычислением требуемой фотометрической яркости воспроизводимого стимула, когда к цветоразностным сигналам добавляются паразитные сигналы A и B.

19.9 ПЕРЕНАСЫЩЕНИЕ ПОЛОСЫ

Безусловно то, что редукция полосы, которой удается достичь при переходе от $3b$, необходимых системе полного разрешения, к $1^1/_2b$ системы яркостного сигнала — это очень серьезная экономия телересурсов. Однако было бы идеально, если бы сигналы цветного телевидения не выходили за рамки полосы телевидения монохромного. С одной стороны таковое совершенно невозможно, поскольку в цветном изображении очевидно больше визуальной информации, нежели в изображении черно-белом. Однако если монохромный сигнал задействует свою полосу с максимальной эффективностью, то в сэкономленное место можно в буквальном смысле слова «впихнуть» хроматическую информацию, не прибегая при этом к расширению полосы. Сей принцип именуется принципом *перенасыщения полосы*.

Как уже было сказано ранее, высшие частоты модулирующих сигналов отвечают только за воспроизведение мелких деталей изображения. Поскольку телевизионное изображение — это результат сканирования люминесцирующей поверхности сериями горизонтальных строк электронного луча, частоты ряда модулирующих сигналов будут встречаться чаще, чем остальные (Mertz и Gray, 1934). Так в системе из 525 строк при 30 кадрах в секунду изображение единичной вертикальной полосы будет пересекаться сканирующим лучом 15750 раз в секунду, то есть даст 15750 Гц т.н. *частоты строчной развертки*.

Если обозначить пространственную *частоту строк* как «f», то понятно что h-количество вертикальных полос, равноотстоящих друг от друга на изображении, будут давать частоту строчной развертки, равную hf Гц. Единственный путь, при котором частота строчной развертки будет равна $(h + {}^1/_2)f$ (где h — целое число) — это смещение полос на половину их ширины по каждой последующей строке полукадра.

На рис. 19.4 схематично показана описанная ситуация передачи изображения прямоугольника с соотношением сторон 4×3, состоящего из 9 полос. Паттерны полос дают следующие частоты строк: f, $2f$, $3f$ и $6f$ (первая колонка), в то время как во второй колонке показаны паттерны, дающие частоты строк $1^1/_2f$, $2^1/_2f$, $3^1/_2f$ и $6^1/_2f$. В третьей, четвертой и пятой колонках показаны паттерны наклонных полос, аппроксимирующие паттерны второй колонки, и дающие, следовательно, по большей части те же частоты строк ($1^1/_2f$, $2^1/_2f$, $3^1/_2f$ и $6^1/_2f$). Мы видим, что угол наклона полос, дающий частоту строк $6^1/_2f$, примерно равен 45°.

Для полукадра из 525 строк $({}^1/_2{\times}525)$ частота строк, соответствующая паттерну полос, наклоненных на 45°, будет равна $({}^1/_2{\times}525{\times}4/3 + {}^1/_2)f$, что полностью идентично максимальной частоте строк в данной системе: $({}^1/_2{\times}525{\times}4/3)f$. Следовательно, паттерн

с полосами, наклоненными на 45°, представляет конец серии паттернов, дающих промежуточные частоты строк $(h + {}^1/_2)f$.

В подавляющем большинстве телевизионных сцен, фрагменты паттернов вертикальных полос первой колонки рис. 19.4 наиболее типичны, нежели фрагменты шашечных или наклоненных паттернов прочих колонок рис. 19.4. Следовательно, в типичной телевизионной передаче существуют энергетические максимумы, приходящиеся на частоты, умноженные на f, с паузами между этими максимумами (см. рис. 19.5).

Более того, в большинстве телевизионных сцен мелких деталей меньше, чем крупных, благодаря чему сигналы высоких частот несут в себе меньше энергии, и благодаря чему цветоразностные сигналы можно передавать на поднесущих, с бо́льшими частотами в яркостной полосе. Для синхронизации с энергетическими паузами яркостного сигнала частоты подбираются так, чтобы нечетные были кратны половине (реже четверти) частоты строк (f).

На рис. 19.6 схематично показана гипотетическая система, в которой два цветоразностных сигнала переданы по двум разным поднесущим высокой частоты в яркостной полосе.

На предлагаемой схеме (весьма часто используемой в лекциях, посвященных передаче телевизионных сигналов) энергия, переданная по каждой из частот, дана как функция от частоты. Сразу отметим, что диаграмма не является собственно графиком, но лишь схематичным представлением ситуации, в которой энергетический максимум дан по всем частотам. Следует особо отметить, что несмотря на ожидаемое появление симметричного частотного паттерна, несущая смещена от центра полосы, поскольку передача ведется по т.н. *частично подавленной боковой полосе* (см. раздел 19.4). Однако с целью сокращения интенсивности наводок (таких как интерференция между сигналами или между цветоразностным и яркостным сигналами) в системах с перенасыщением полосы передача цветоразностных сигналов ведется обычно по двойной боковой полосе.

Стоит сказать, что цветоразностные сигналы дают энергию на поднесущей не только на своей частоте, но также на различных частотах выше и ниже ее. Однако вновь, при передаче относительно редких шашечных или наклонных паттернов энергия будет «концентрироваться» на частотах, отличных от частоты поднесущей, умноженной на частоту строк (f). Следовательно, если частота поднесущей равна $(h + {}^1/_2)f$, энергия сигнала на ней будет «концентрироваться» на частотах $(h + {}^1/_2)f + jf$, где «j» — любое другое целое число, нечетнократное половине частоты строк. Следовательно, частоты, на которых поднесущая дает сигнал, соответствуют тем частотам, на которых основная несущая обычно не имеет сигнала и, следовательно, два частотных распределения перемежаются.

19.9.1 Интерпретация сигнала

Нетрудно догадаться, что приемник должен «уметь» различать яркостный и цветоразностные сигналы, что достигается за счет электронных делителей входного сигнала на частоты, примерно кратные частоте строк f, либо нечетнократные половине частоты строк, то есть: вначале сигналы толкуются как яркостные, а затем из них выделяются цветоразностные. Как уже было сказано — такая интерпретация единственно верная.

По некоторым видам паттернов, в частности показанным на рис. 19.4, яркостный

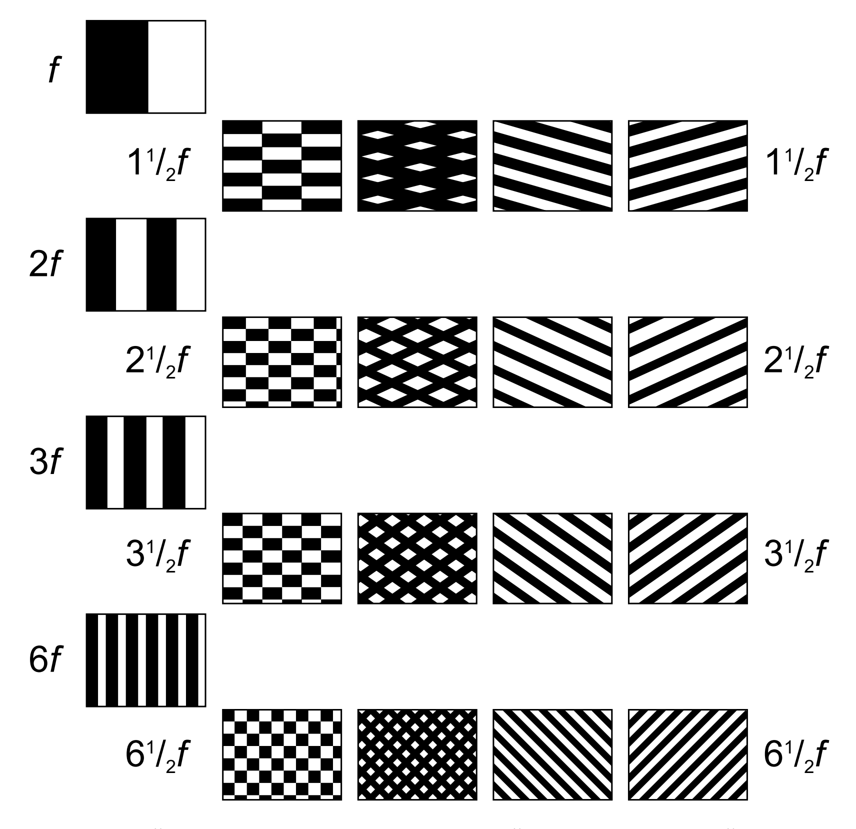


Рис. 19.4 Паттерны линий, которые в гипотетической девятистрочной системе дают частоты строчной развертки $1^1/_2f$, $2^1/_2f$, $3^1/_2f$ и $6^1/_2f$, где «f» — частота строк.

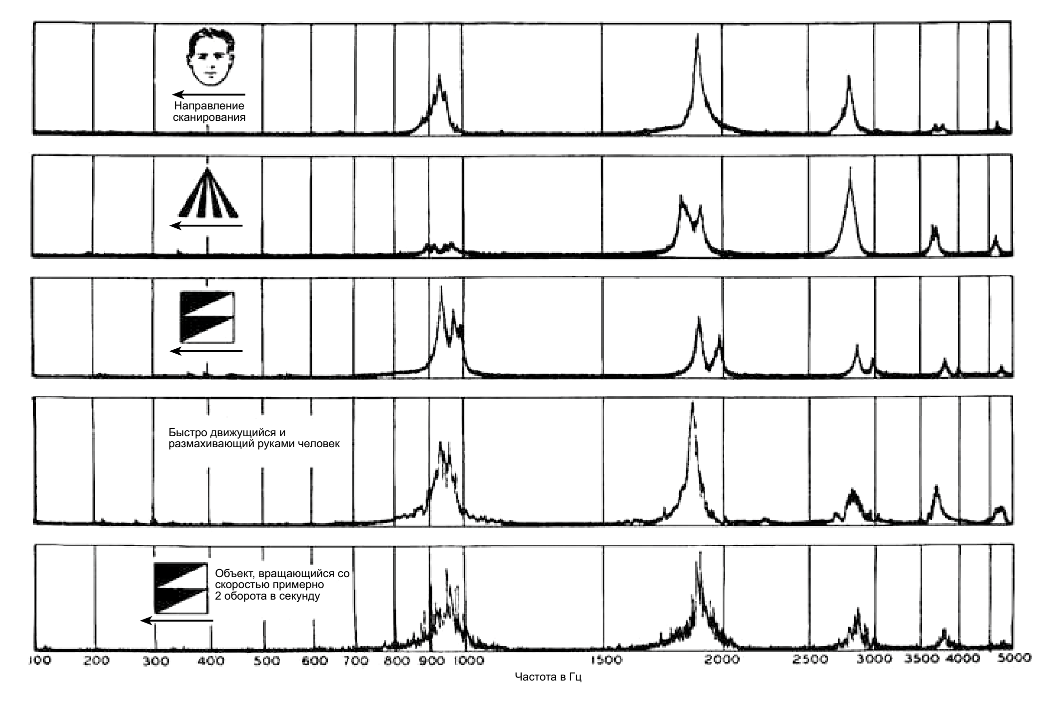


Рис. 19.5 «Спектры» четырех черно-белых телевизионных передач: энергия «концентрируется» на частотах, кратных частоте строк (в данном случае 940 Гц) (Mertz и Gray, 1934).

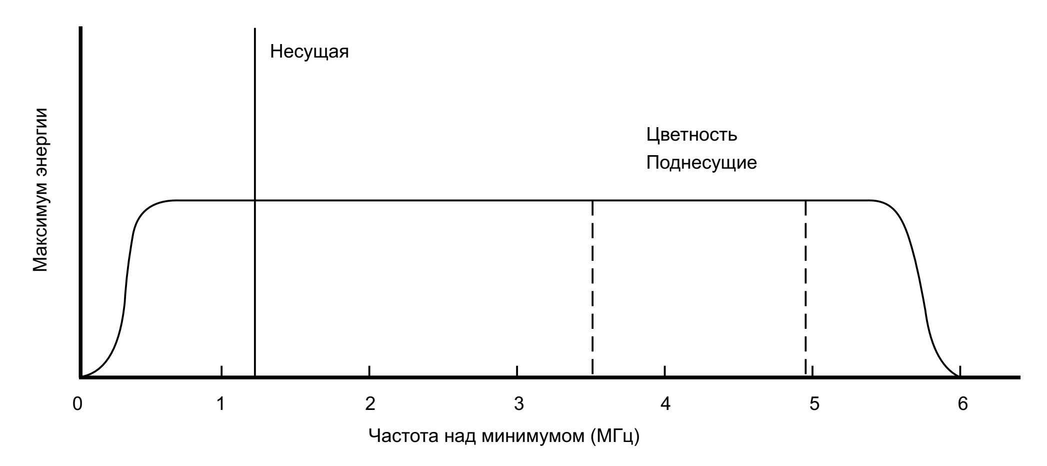


Рис. 19.6 Гипотетический метод перенасыщения полосы сигналов цветного телевидения. Частоты двух поднесущих цветоразностных сигналов нечетнократны половине частоты строк.

сигнал ошибочно интерпретируется и визуализируется приемником как цветоразностный и наоборот. Однако такое может случиться лишь в мелких деталях изображения и только в паттернах определенного типа, к примеру таких как тонкие диагональные полосы разной яркости, воспроизводимые порой со случайным паразитным хроматическим оттенком.

19.10 ПЕРЕНАСЫЩЕНИЕ ПОЛОСЫ В МОНОХРОМНЫХ ТЕЛЕПРИЕМНИКАХ

Когда частотно уплотненный сигнал принимается заурядным монохромным приемником, энергия не делится на две части согласно кратности частоты строк и нечетнократности половине частоты строк, как в цветных телеприемниках. В результате цветоразностные сигналы визуализируются как яркостные, но распадаются при этом (за счет колебаний поднесущей) на шашечные паттерны: последовательные строки каждого полукадра визуализируют паттерны, сдвинутые горизонтально на одну ступень этого паттерна.

Сие ведет к появлению в монохромном приеме цветных телепередач т.н. *возмущающего эффекта*, но поскольку цветоразностные сигналы при передаче информации о белых, серых и черных стимулах равны нулю, данный эффект в этих случаях не возникает (и остается весьма малым при передаче информации о стимулах низкой насыщенности). Однако, когда передается информация о стимулах высокой колориметрической чистоты (т.е. насыщенных по ощущению) возмущающий эффект заметен, и, несмотря на то, что колебания поднесущей добавляют яркости к светлым фрагментам изображения и вычитают ее из темных его областей — средняя фотометрическая яркость изображения, при рассматривании паттерна с достаточного расстояния, почти не меняется.

19.11 МЕТОД ПЕРЕНАСЫЩЕНИЯ НЕСУЩЕЙ

Несмотря на то, что отбор из диапазона частот нечетнократных половине частоты строк, помогает уйти от интерференции между цветоразностными и яркостными сиг-

налами, возникает определенный недостаток пространства для поднесущих в яркостной полосе (каждая с боковой полосой равной $\pm^1/_4 b$). Следовательно, вполне оправданной является концепция *перенасыщения несущей частоты* (рис. 19.7). На схеме рис. 19.7 два цветоразностных сигнала передаются на общей поднесущей, но, при этом, либо со сдвигом фаз на четверть цикла, либо на строках только разных полукадров. Телеприемник с помощью т.н. *фазочувствительных детекторов* или при помощи *устройств задержки на строку* (или того и другого) разделяет и восстанавливает принятые сигналы (далее см. главу 22).

* * *

Итак, мы видим, что действующие системы широковещательного цветного телевидения основаны на принципах редукции полосы, постоянства фотометрической яркости (за счет того, что одним из трех передаваемых сигналов является сигнал яркостный), цветоразностных сигналов, перенасыщения полосы и перенасыщения несущей. Все перечисленные принципы будут детально описаны в гл. 22.

Теперь же мы должны рассмотреть две принципиально важных темы: влияние обработки сигналов на результаты цветовоспроизведения и значение нелинейностей в обработке этих сигналов.

19.12 ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

19.12.1 Телесистемы на базе классических трихроматических кривых Стандартного наблюдателя

В гл. 7 было показано, что телекамера должна отвечать критерию Лютера — Айвса, т.е. кривые спектральной чувствительности ее сенсоров должны быть эквивалентны трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя $[\bar{r}(\lambda),\ \bar{g}(\lambda),\ \bar{b}(\lambda)]$ по кардинальным стимулам телеприемника (то есть кривым, определяющим колориметрические количества этих стимулов, необходимые для визуального уравнивания монохроматических стимулов спектра каждой из длин волн — см. разделы 7.4 и 8.3). Типичный набор трихроматических кривых по монохроматическим уравнивающим (карди-



Рис. 19.7 Система компрессии несущей. Частота несущей сигналов цветности (цветоразностных сигналов) одинакова и нечетнократна частоте строк, но при этом имеется фазовый сдвиг на 90° или передача по альтернативным строкам каждого из полукадров.

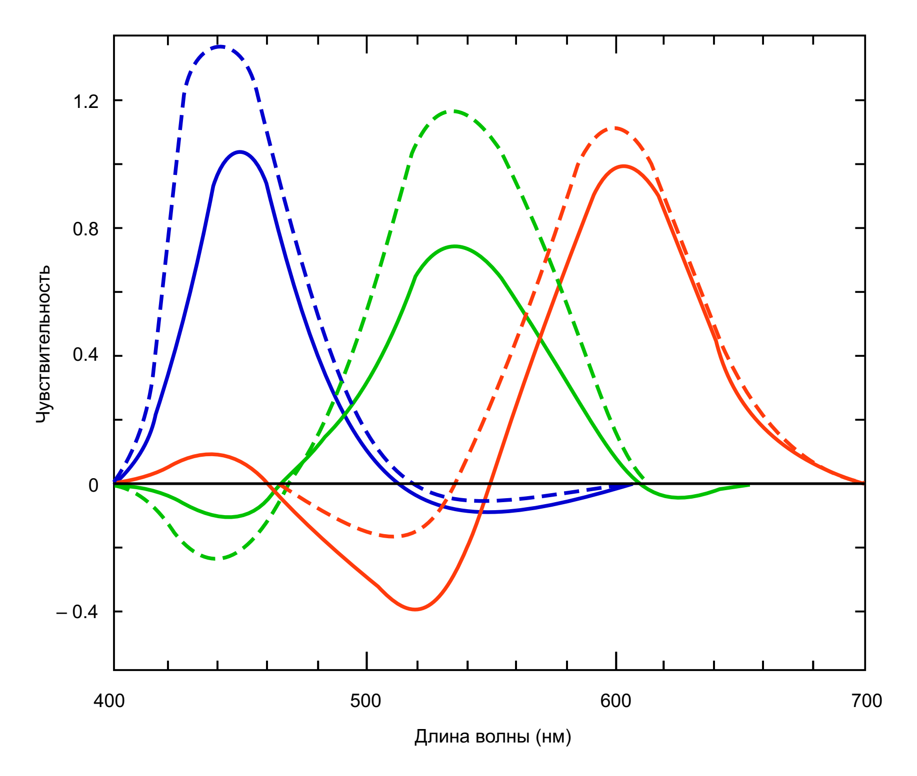


Рис. 19.8 Трихроматические кривые Стандартного наблюдателя по кардинальным стимулам, воспроизводимым люминофорами типичных телеприемников (B.R.E.M.A., 1969). То же для люминофров NTSC-стандарта.

нальным) стимулам дан на рис. 7.4, а на рис. 19.8 по кардинальным стимулам, воспроизводимым NTSC-люминофорами, применявшимися на заре цветного телевидения (пунктирные линии) и BREMA-люминофорами (BREMA, 1969), применяемыми ныне (сплошные линии). Цветности кардинальных стимулов обоих комплектов даны на рис. 21.9.

Мы видим, что приведенные трихроматические кривые Стандартного наблюдателя по красному, зеленому и синему кардинальным стимулам содержат в себе участки как положительных, так и отрицательных значений, и, хотя сие обстоятельство создает определенные сложности в применении этих кривых в телекамерах, использование трихроматических кривых Стандартного наблюдателя гарантирует получение колориметрически корректной репродукции сцен, стимулы которых лежат в пределах треугольника, образованного на диаграмме цветностей точками кардинальных стимулов R, G, B. Сказанное выведено в позицию 1 рис. 19.9.

19.12.2 Телесистемы с матрицированием в телекамере

Нельзя не сказать, что введение участков отрицательных значений в кривые спектральной чувствительности телекамеры технически весьма затруднительно. Однако вполне приемлемых результатов можно добиться, используя набор трихроматических кривых с сугубо положительными значениями, в частности, таких как CIE $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, с последующим получением требуемых трехстимульных значений R, G, B из X, Y, Z (причем предпочтительно *до* передачи сигналов, дабы избежать выполнения этой операции в телеприемнике). Требуемая манипуляция описана в разделе

	Кривые спектральной чувствительности телекамеры	**Дополнительные манипуляции с сигналами**	**Воспроизводящие (кардинальные) стимулы телеприемника**	**Конечный результат визуализации**
1	Трихроматические кривые с отрицательными участками	Нет	Идентичны трихроматически кривым телекамеры	Колориметрически корректное воспроизведение всех стимулов внутри охвата телеприемника
2	Полностью положительные трихроматические кривые	Матрицирование в телекамере или в телеприемнике	Соответствуют матрицированным трихроматически кривым телекамеры	
3		Нет	Имеют те же доминирующие длины волн, что и кардинальные стимулы телекамеры	Чистота цвета всех воспроизводимых стимулов слегка снижена
4	Положительные участки трихроматических кривых с некоторыми отрицательными фрагментами	Нет	Идентичны полным трихроматическим кривым телекамеры	Легкие погрешности при воспроизведении большинства стимулов
5		Матрицирование в телекамере или в телеприемнике		Легкие погрешности при воспроизведении большинства стимулов

Рис. 19.9 Влияние характера трихроматических кривых телекамеры на точность цветовоспроизведения.

8.4, посвященном *колориметрическим преобразованиям*, и в контексте цветного телевидения выражающимся обычно в виде операции *матрицирования*:

$$E_R = a_1 E_X + a_2 E_Y + a_3 E_Z$$
$$E_G = a_4 E_X + a_5 E_Y + a_6 E_Z$$
$$E_B = a_7 E_X + a_8 E_Y + a_9 E_Z$$

где $a_1 \ldots a_9$ — константы. Сказанное выведено в позицию 2 рис. 19.9 (Herman, 1975).

Отметим, что нет никакой необходимости в том, чтобы полностью положительные кривые спектральной чувствительности телекамеры строго совпадали с трихроматическими кривыми $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$: в принципе, может использоваться их любая линейная комбинация. Однако, ежели одна из кривых спектральной чувствительности — это кривая $\bar{y}(\lambda)$, то соответствующие трехстимульные значения окажутся равными Y, что позволит получать сигнал E_Y непосредственно.

Вместе с тем, очевидное преимущество данного подхода создает дополнительные сложности, поскольку в фактических системах имеют место эффекты нелинейности (см. раздел 20.8), что, в свою очередь, ведет к внушительным светопотерям в т.н. *светоделительных телекамерах*.

Наконец отметим, что матрицирование в свое время стало реальным благодаря внедрению в конструкцию телекамеры т.н. *плюмбикона*, обладающего великолепным соотношением сигнал/шум и, главное, линейной характеристикой (см. раздел 20.6)[1]. Отметим также, что матрицирование практикуется сегодня и в отношении CCD-сенсоров (см. раздел 20.5).

19.12.3 Системы на базе компромисса Айвса — Эбнея — Юла

Третий возможный вариант колориметрической идеологии телесистем основан на принятии компромисса Айвса-Эбнея-Юла, описанного в разделе 7.9: полностью положительные кривые спектральной чувствительности выбираются так, чтобы полностью совпасть с трихроматическими кривыми Стандартного наблюдателя по кардинальным стимулам P_1, P_2 и P_3, имеющим те же доминирующие длины волн, что и репродукционные кардинальные стимулы R, G, B.

Данный подход хорош тем, что чреват лишь легкой потерей колориметрической чистоты воспроизводимых стимулов, что малозаметно. Принцип позволяет уйти от неожиданных цветоискажений, возникающих тогда, когда координаты цветности стимулов сцены выходят за пределы треугольника цветностей R, G, B (что свойственно двум первым вариантам устройства телесистем). Плюс к тому, отпадает необходимость в матрицировании сигналов — этапа, который неминуемо ведет к снижению соотношения сигнал/шум (некоррелированный «шум» всегда имеет место даже несмотря на то, что в дальнейшем мощности сигналов могут прибавляться или вычитаться).

19.12.4 Системы на базе «сугубо положительных участков»

Четвертый вариант колориметрического подхода к организации телесистемы весьма широко распространен и строится на том, что кардинальным (воспроизводящим) стимулам соответствуют только положительные участки трихроматических кривых Стандартного наблюдателя. Коль скоро как минимум одна из таких кривых имеет отрицательные значения на некоторых волнах видимого спектра, при воспроизведении большинства стимулов возникают погрешности. Практика свидетельствует однако, что эти недочеты не фатальны: опыт цветной фотографии подтверждает, что точная форма кривых спектральной чувствительности сенсоров далеко не критична в отношении большинства стимулов (см. к примеру рис. 4.3). Итак, несмотря на то, что обсуждаемый принцип далеко не лучший с точки зрения достоверности цветопередачи, его достоинство — в простоте.

Еще одним плюсом идеи «сугубо положительных участков» является то, что результирующие «красная» и «зеленая» кривые перекрываются меньше, чем в случае типичных полностью положительных кривых: сие хорошо видно по рис. 19.10, где набор спектрально острых и полностью положительных трихроматических кривых сравнивается с набором кривых спектральной чувствительности, типичных для телекамер и аппроксимирующих при этом положительные участки кривых, показанных на рис. 19.8.

Отметим, что бóльший спектральный разнос положительных участков обеспечивает

---

[1] Плюмбикон (от лат. plumbum-свинец и греч. eikon — изображение), передающая телевизионная трубка, разновидность видикона, отличающаяся устройством светочувствительной мишени. — *Прим. пер.*

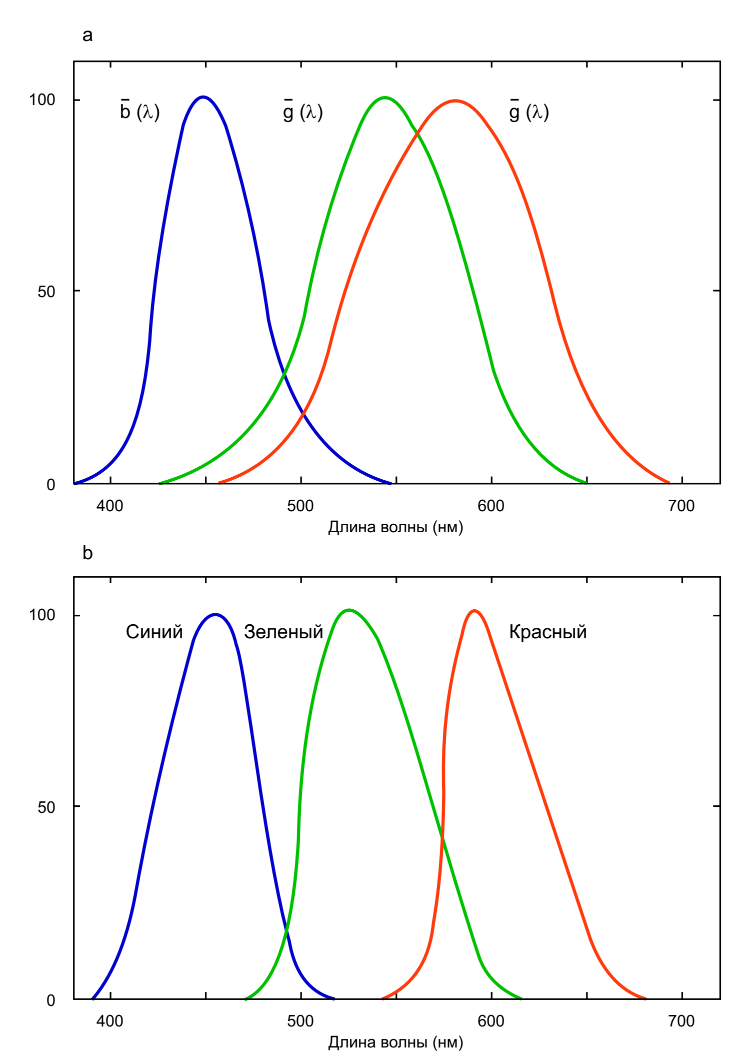


Рис. 19.10 а — спектрально-заостренные трихроматические кривые зрительной системы; b — кривые спектральных чувствительностей типичной телекамеры, аппроксимирующие положительные участки трихроматических кривых рис. 19.8.

бо́льшую эффективность телекамер, задействующих т.н. *дихроичные светоделительные зеркала* (см. гл. 20). Однако оборотная сторона такой конструкции в том, что приходится полностью отказываться от колориметрически точного анализа передаваемой сцены. Вместе с тем, Спрозон (Sproson, 1966) говорит о том, что когда положительные участки трихроматических кривых Стандартного наблюдателя задействуются вместе с матрицированием, величину колориметрических погрешностей можно свести к минимуму путем эмпирической подгонки коэффициентов матрицы. Сказанное представлено в пятой позиции рис. 19.9 и используется весьма широко (см. раздел 20.11).

Игнорирование отрицательных участков трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (четвертая позиция на рис. 19.9) в системах, основанных на применении яркостного сигнала, проявляет себя тем, что при использовании «тригорбых» кривых спектральной чувствительности вместо «одногорбой» $\bar{y}(\lambda)$-кривой (требуемой для обеспечения достоверной адекватной фотометрической яркости воспроизводимых стимулов), фотометрическая яркость стимулов, воспроизводимых экраном как монохромных, так и цветных приемников, часто оказывается некорректной. Сие весьма за-

метно, в частности в случае синих стимулов, которые воспроизводятся избыточно яркими.

Матрицирование, применяемое в пятом варианте телесистем, позволяет существенно уменьшить эти погрешности.

19.12.5 Системы с матрицированием в телекамере или телеприемнике

Пятый вариант реализуется за счет выполнения операции матрицирования либо в камере, либо в приемнике. В плюмбиконовых или CCD-камерах на участке их линейного отклика вполне допустимо выполнять матрицирование, задействуя фактические сигналы, выдаваемые трубкой или массивом CCD-сенсоров. Если матрицирование выполняется телеприемником или даже самим дисплеем — матрицирование оказывается некорректным (поскольку сигналы на данном этапе линейно соотносятся с оптическим изображением лишь на коротком участке — см. след. раздел). Однако вычисления и практические тесты показали, что во втором случае ошибки не столь уж велики.

Наконец отметим, что большим преимуществом матрицирования, выполняемого в телеприемнике, является то, что оно позволяет использовать практически любой набор люминофоров (DeMarsh, 1974).

19.13 ГАММА-КОРРЕКЦИЯ

До сего момента мы строили наши рассуждения, предположив полную линейность взаимоотношений между электрическим сигналом телекамеры и соответствующим ему оптическим сигналом телеприемника. Однако светоотдача электронно-лучевых трубок телеприемников нелинейна и приблизительно пропорциональна кубу приложенного напряжения. То есть, если логарифм фотометрических яркостей стимулов, воспроизводимых электронно-лучевой трубкой, взять как функцию от логарифма приложенного к ней напряжения, то тангенс угла наклона полученной кривой (именуемый «гамма» — γ) окажется примерно равным 3.0 ($\gamma = 2.8 \pm 0.3$ — типичное значение у цветных телеприемников).

С точки зрения соотношения сигнал/шум предпочтительна высокая гамма, поскольку теневые области изображения, в которых шум наиболее выражен, воспроизводятся в этом случае почти черными. В то же время, если для монохромного изображения гамма 3.0 оказывается вполне приемлемой, цветное изображение с тем же значением гамма будет давать тяжелые цветоискажения.

Предположим, сигналы E_R, E_G и E_B нацелены на воспроизведение цветового стимула $R(\mathrm{R}) + G(\mathrm{G}) + B(\mathrm{B})$ на линейном дисплее. Если эти сигналы будут приложены к дисплею, работающему по кубической зависимости ($\gamma = 3$), результирующий стимул будет равен $R^3(\mathrm{R}) + G^3(\mathrm{G}) + B^3(\mathrm{B})$. К примеру, если $R = 1$, $\mathrm{G} = {}^1/_2$, $B = {}^1/_2$, а единичные количества RGB-стимулов дают белый (W), то интересующий нас стимул будет равен ${}^1/_2(\mathrm{W}) + {}^1/_2(\mathrm{R})$. Однако воспроизведенный стимул окажется равен $R = 1$, $G = {}^1/_8$, $B = {}^1/_8$, то есть ${}^1/_8(\mathrm{W}) + {}^7/_8(\mathrm{R})$. Следовательно, фотометрическая яркость воспроизведенного стимула окажется сниженной, а его колориметрическая чистота — повышенной.

Простейшим способом решения данной проблемы является предыскажение сигналов E_R, E_G и E_B в передатчике до $E_R^{1/\gamma}$, $E_G^{1/\gamma}$, $E_B^{1/\gamma}$ (то есть $E_R^{1/3}$, $E_G^{1/3}$, $E_B^{1/3}$). Яркостный сигнал передается затем как $E'_Y = lE_R^{1/\gamma} + mE_G^{1/\gamma} + nE_B^{1/\gamma}$, а цветоразностные как $E_R^{1/\gamma} - E'_Y$ и $E_B^{1/\gamma} - E'_Y$.

Соответствующий зеленый цветоразностный сигнал $(E_G^{1/\gamma} - E'_Y)$ восстанавливается телеприемником по уравнению:

$$E_G^{1/\gamma} - E'_Y = -\frac{1}{m}\left(E_R^{1/\gamma} - E'_Y\right) - \frac{n}{m}\left(E_B^{1/\gamma} - E'_Y\right)$$

Затем, добавив E'_Y ко всем трем цветоразностным сигналам, мы можем восстановить напряжения $E_R^{1/\gamma}$, $E_G^{1/\gamma}$, $E_B^{1/\gamma}$ до E_R, E_G и E_B и приложить их к соответствующему дисплею (работающему по данной γ-зависимости) для получения корректных *RGB*-величин кардинальных (воспроизводящих) стимулов.

Отметим, что описанный метод дает результаты, лишенные каких-либо хроматических искажений, однако фотометрическая яркость воспроизводимых стимулов, реализуемая за счет E'_Y (которую будут иметь все стимулы, воспроизведенные монохромной трубкой, и стимулы мелких деталей, воспроизведенные цветным телеприемником) окажется равной $\left(E'_Y\right)^\gamma$. Отношение фотометрической яркости стимула, реализованной за счет E'_Y, к требуемой яркости равно:

$$\frac{\left(E'_Y\right)^\gamma}{E_Y} = \frac{\left(lE_R^{1/\gamma} + mE_G^{1/\gamma} + nE_B^{1/\gamma}\right)^\gamma}{lE_R + mE_G + nE_B};$$

в худшем случае (колориметрически чистые синие стимулы):

$$\frac{n^\gamma E_B}{nE_B} = n^{\gamma-1} = 0.11^{1.8} = 0.019,$$

если принять значения $n = 0.11$ и $\gamma = 2.8$ за наиболее типичные.

Так в данном случае яркостный сигнал E'_Y несет в себе информацию лишь о 2% реальной яркости стимула; следовательно высокочистые стимулы малых размеров воспроизводятся слишком темными. Наряду с этим страдает и технологическая совместимость телесистем: монохромные дисплеи будут воспроизводить данный стимул со слишком низкой фотометрической яркостью, однако, на практике, благодаря нелинейности электронно-лучевых трубок 2% цветоразностного сигнала поднимаются до 5% (см. раздел 19.10), в результате чего монохромные ошибки не столь уж велики и крупные области изображения воспроизводятся достаточно корректно.

Однако, коль скоро сигнал E'_Y не несет в себе информации о всей фотометрической яркости интересующего нас стимула, остаток должен быть передан за счет модуляции поднесущей, и, следовательно принцип постоянства фотометрической яркости не соблюдается (вследствие чего усиливается ощущение шума и интерференции).

Стоит сказать также, что модуляция поднесущей весьма ограничена по полосе, в результате чего страдает четкость изображения, поскольку яркостное содержимое поднесущей также будет ограничено по полосе. Однако для белых стимулов $E_R = E_G = E_B$ и $(E'_Y)^\gamma / E_Y = 1$, а также для большинства нейтральных теней данное отношение будет немногим меньше единицы. Следовательно, описанные выше недостатки касаются в основном только колориметрически чистых стимулов (см. рис. 22.4).

19.13.1 Альтернативные методы гамма коррекции

Существует несколько альтернативных методов гамма коррекции, но все они усложняют конструкцию телеприемника. К примеру, если яркостный сигнал был сфор-

мирован до предыскажения E_R-, E_G- и E_B-сигналов и переданы эти сигналы были как $E_R^{1/\gamma} - E_Y^{1/\gamma}$, $E_B^{1/\gamma} - E_Y^{1/\gamma}$ и $E_Y^{1/\gamma}$, то перечисленные выше трудности не возникают. Однако восстановление «зеленого» сигнала (прежде чем применить этот сигнал к ЭЛТ) оказывается намного более сложным, требующим вначале т.н. *гамма предыскажения* (т.е. возведения в степень γ), вычисления E_G, а затем т.н. *гамма компенсации* (т.е. возведения в степень 1/γ).

До сего момента мы рассуждали так, что все сигналы предыскажаются с помощью общего степенного коэффициента 1/γ. Однако на практике гамма предыскажение, применяемое к сигналам, составляет 1/2.2, тогда как цветные телеприемники имеют гамма тонопередачи порядка 2.8 (±0.3). В результате гамма воспроизводимого изображения (т.е. его коэффициент контрастности) вырастет по отношению к оригинальной сцене с коэффициентом 2.8/2.2, то есть, в 1.273 раза. Такое увеличение коэффициента контрастности изображения необходимо для компенсации снижения визуального контраста изображения, вызванного тусклым просмотровым окружением обычного телевизионного просмотра (см. раздел 6.5) (Bartleson и Breneman, 1967; Pitt и Winter, 1974). Однако, как мы можем видеть из рис. 19.11, при этом имеет место рост колориметрической чистоты воспроизводимых стимулов и паразитный сдвиг по их доминирующей длине волны. Рост колориметрической чистоты может оказаться весьма кстати в плане компенсации недостатка чистоты цвета воспроизводимых стимулов, возникающего за счет эффекта тусклого окружения и еще ряда факторов. Но, наряду с тем, сдвиг по доминирующей длине волны может привести к искажениям цветового тона этих стимулов.

Напомним, что по мере роста освещенности окружения, то есть по мере уравнивания фотометрической яркости окружения со средней фотометрической яркостью изо-

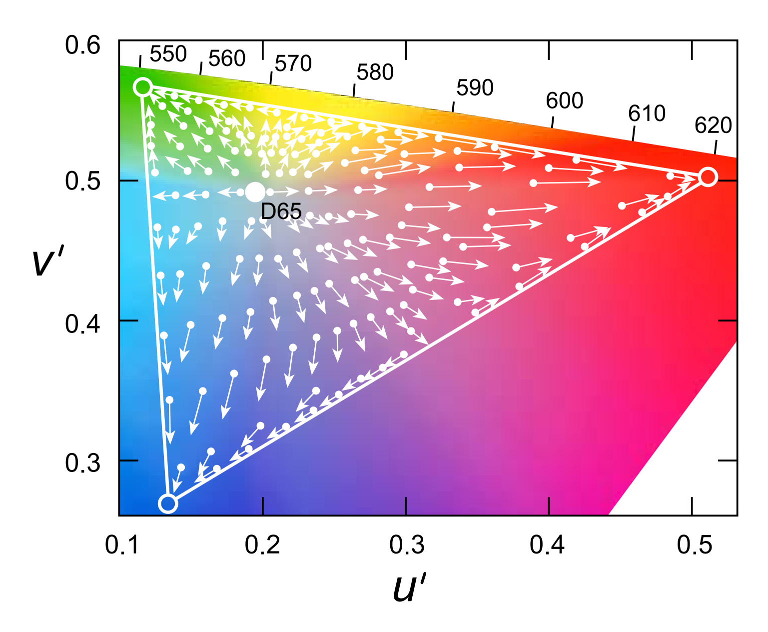


Рис. 19.11Сдвиг цветностей воспроизводимых стимулов, вызванный изменением гамма тонопередачи телевизионной системы от 1.0 до 1.273. Напомним, что для компенсации эффекта снижения визуального контраста тусклым просмотровым окружением (обычные условия телепросмотра) необходима гамма тонопередачи 1.25 (Brown, 1971. Рис. 3).

бражения на экране, появляется паразитная подсветка изображения, снижающая его коэффициент контрастности от 1.25 примерно до 1.0 (Novick, 1969).

Также было показано, что для обеспечения коэффициента контрастности изображения 1.25 при окружающем освещении, дающем тусклое окружение, то есть когда фотометрическая яркость окружения оказывается примерно равной одной десятой фотометрической яркости белой точки изображения (типичная ситуация), изображение при темновом показе должно иметь коэффициент контрастности равный 1.5 (DeMarsh, 1972). Последнее достигается:

— путем управления уровнем черного в телекамере, в результате чего ее коэффициент контрастности повышается от 0.45 ($\gamma = 1/2.2$) до 0.54;

— путем аналогичного повышения коэффициента контрастности телеприемника от 2.8 до 3.3;

— путем сочетанного управления коэффициентами контрастности обоих приборов.

Стоит сказать также, что гамма-коррекция приводит к тому, что сигнал малых напряжений становится совсем маленьким, что, в свою очередь, может привести к нежелательному росту колориметрической чистоты воспроизводимых стимулов, особенно красных, оранжевых и желтых (то есть, в воспроизведении которых, как правило, принимает участие очень низкий «синий» сигнал). Характер и степень данного эффекта весьма разнятся между телекамерами.

Наконец отметим, что гамма-корректированные сигналы $E_R^{1/\gamma}$, $E_G^{1/\gamma}$ и $E_B^{1/\gamma}$ обычно обозначают как E'_R, E'_G, и E'_B соответственно.

19.14 ШУМОПОДАВЛЕНИЕ

Паразитные эффекты, возникающие за счет слабого соотношения сигнал/шум можно подавить путем усреднения телевизионных сигналов более чем по одному полукадру, причем даже тогда, когда изображение находится в движении (Sanders, 1980).

19.15 ПРЯМОЕ СПУТНИКОВОЕ ВЕЩАНИЕ

Т.н. геостационарные спутники, т.е. спутники, находящиеся относительно Земли в фиксированной позиции, — это весьма удобнее средство передачи телевизионных сигналов на очень большие расстояния. Спутниковая антенна, расположенная, скажем на крыше здания (то есть в прямой «видимости» спутника), принимает сигналы, которые затем декодируются телеприемником. Европейский союз радиовещания[1] в свое время утвердил целое семейство систем телесигналов спутникового вещания — MAC (Multiplexed Analogue Components).

MAC-сигналы подвергают яркостный сигнал компрессии по каждой строке до двух третей от их реального времени, а оставшееся время используют для передачи одного из цветоразностных сигналов, подвергнутого компрессии до одной трети его реального времени. Каждая последующая строка аналогичным путем передает второй цветоразностный сигнал. Декодер телеприемника восстанавливает сжатые по времени яркостный и цветоразностные сигналы до их реального времени.

---

[1] Европейский союз радиовещания (ЕСР), крупнейший международный радиовещательный союз. Основан 12 февраля 1950 г. частью государств, вышедших из Международной организации радиовещания и телевидения. — *Прим. пер.*

Стоит сказать, что в отличие от систем частотного уплотнения способ сепарации сигналов, применяемый в спутниковых системах (т.е. их деления на яркостный и цветоразностные сигналы) позволяет избежать появления хроматических «паразитов» в паттернах высокой пространственной частоты (см. раздел 19.9).

19.16 ТЕЛЕВИДЕНИЕ ВЫСОКОЙ ЧЕТКОСТИ (ТВЧ)

19.16.1 Виды ТВЧ-систем

525- и 625-строчные системы широковещательного цветного телевидения развивались в то время, когда вопросы совместимости с монохромными телеприемниками и вопросы экономии полосы были критичны. Наступление новой эры передачи телесигналов, включающей в себя прямое спутниковое телевещание, кабельные системы (обычные и волоконно-оптические), наряду с развитием цифровых технологий, а также появлением изощренных методов компрессии сигналов, позволили строить системы с бóльшим числом строк, каждая из которых при этом несет большее количество визуальной информации.

Первую ТВЧ-систему, построенную, в частности, на базе 1125 строк вертикальной развертки, внедрила Японская радиовещательная корпорация (NHK, Nippon Hoso Kyokai), но предлагались также системы, построенные на базе 1050 и 1250 строк (см. табл. 19.2) (Fink, 1980).

ТАБЛИЦА 19.2 Параметры некоторых телевизионных систем высокой четкости

Система	1125	525 ×2	625×2
Частота строк	1125	1050	1250
Формат изображения	16:9	16:9	16:9
Кол-во образцов на строку	1920	1920	1920
Полукадры в сек	60	59.94	50
Целевой регион	Япония	США	Европа

Частота чересстрочных полукадров 59.94 Гц (но не строго 60 Гц) по сей день используется в США, дабы избежать т.н. *эффектов пульсации*, возникающих между цветоразностными сигналами и сигналом звуковым.

19.16.2 Совместимость ТВЧ-систем с системами стандартной четкости

Внедрение любой системы высокой четкости в пространство вещания, в котором действуют 525- или 625-строчные системы четкости стандартной неизбежно поднимает вопрос о технологической совместимости телесистем: если (наряду с приемниками высокой четкости) новые сигналы будут устойчиво приниматься и визуализироваться действующими приемниками стандартной четкости, то процесс внедрения ТВЧ-систем существенно облегчится. Однако на пути к достижению необходимой совместимости возникают серьезные инженерные сложности, в частности из-за большой свободы в выборе методов оптимизации ТВЧ-систем, в частности из-за применения цифровых технологий, которые, безусловно, повышают эффек-

ТАБЛИЦА 19.3 Системы широковещательного цифрового телевидения

Активные строки	Пикселы на строку	Формат	Mbps	Уровень качества
1080	1920	16:9	45	Студийное HDTV
1080	1920	16:9	18	HDTV
1080	1440	4:3	18	4:3 HDTV
720	1280	16:9	18	
720	960	4:3	18	
480	720	4:3	9	Студийное 525
480	720	4:3	4.5	NTSC
240	352	4:3	1.2	VHS
120	176	4:3	0.3	Ниже VHS

тивность систем телевидения высокой четкости, но препятствует обеспечению их технологической совместимости со стандартными телевизионными системами. По этой причине (а также по причине бурного развития технологии передачи цифровых сигналов) широковещательное телевидение высокой четкости используется исключительно с новыми цифровыми системами. Характеристики одной из таких систем даны в табл. 19.3.

Стоит сказать также, что определенной степени совместимости можно достичь за счет использования специального цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), например специальной телеприставки (см. раздел 31.7): несмотря на увеличение общей стоимости устройства преобразователь позволят интерпретировать и визуализировать цифровые сигналы с несравнимо меньшими искажениями.

19.16.3 Скорость передачи данных в ТВЧ-системах

Количество *бит* (*binary units — bits*) в секунду, необходимое для эффективной передачи цифрового телевизионного сигнала, можно установить следующим образом: если количество возможных уровней сигнала на данный пиксел (пиксел — элемент цифрового изображения) мало́, то на участках плавных тональных или/и хроматических переходов (градиентов) в изображении могут возникнуть характерные паразитные контуры (т.н. дробление градиентов — *Прим. пер.*), однако если уровни сигнала подобраны так, что обеспечивают визуальную равномерность градиентов, то достаточным оказывается комплект из 90 уровней ($6^1/_2$ бит, то есть $2^{6.5}$) — см. гл. 30. Однако если уровни распределены неравномерно, необходимо 256 уровней (8 бит — 2^8). То есть, мы говорим, что амплитуда цикла, представляющая пару пикселей, требует для своей спецификации 8-битного кодирования.

Действующие 525- и 625-строчные системы используют примерно 5 МГц полосы, тогда как сигналы высокой четкости (поскольку число строк удвоено) потребуют расширения полосы в два раза; вдвое увеличится и число пикселей на строку, и в 4/3 раза — формат изображения (поскольку 16/9 в 4/3 раза больше чем формат 4/3). Итого вместе:

$$2 \times 2 \times 4/3 = 5\frac{1}{3}.$$

То есть ширина полосы окажется равной $5 \times 5\frac{1}{3}$ или примерно 27 МГц. Представление каждого цикла требует 8 бит, в результате чего т.н. *битрейт* (*битовая скорость передачи данных*, *bps — bit per second*) по яркостному каналу составит $27 \times 10^6 \times 8 = 216$ мегабит в секунду (Mbps) и 54 Mbps — по хроматическим каналам (сигналы в которых подвергнуты т.н. временно́му мультиплексированию). В итоге, потребуется скорость передачи данных в 270 Mpbs. Такой гигантский целевой битрейт, разумеется, не дает возможности использовать цифровой сигнал в широковещательном телевидении, но, к счастью, придуманы способы снижения требований к скорости: поскольку по мере роста пространственной частоты стимулов зрение прогрессивно теряет способность выявлять тональные отличия между ними (см. рис. 18.15) — общее число бит, требуемых на полукадр, можно уменьшить пропусканием сигнала через различные пространственно-частотные фильтры (т.е. фильтры, позволяющие снизить число требуемых бит при передаче информации о стимулах высоких пространственных частот); плюс к тому, на руку тот факт, что каждый последующий полукадр весьма мало отличен от предыдущего. За счет этого приема комитетам JPEG (Joint Photographic Experts Group — Объединенная группа экспертов по машинной обработке фотографических изображений) и MPEG (Motion Pictures Experts Group — Экспертная группа по кинематографии) Международной организации по стандартизации (ISO) удалось понизить требуемый битрейт с 270 Mbps до 45 Mbps — по внутристудийным передачам и до 18 Mbps — по широкому телевещанию (см. раздел 30.10).

Как видно из табл. 19.3, представленная в ней система, оперирует не только 1080 строками высокой четкости, но и 720 четкости промежуточной, 480 строками стандартной четкости, 240 строками четкости видеозаписи и 120 строками низкой четкости. При этом используются следующие частоты кадров: 23.97, 24, 29.97, 30 и 60 кадр/с. Частота 29.97 кадр/с принята в США, 30 кадр/с — текущая ТВЧ-частота в Японии, 24 кадр/с — стандартная киночастота передач категории «прайм-тайм» (т.н. лучшего эфирного времени), 23.97 кадр/с — «облегченный» вариант для обеспечения совместимости с частотой 29.97 кадр/с.

Перечисленные частоты реализуются либо при чересстрочной развертке, либо при построчной. Отметим, что специальные заголовки данных позволяют приемнику распознать действующий формат паковки этих данных.

Цветоразностные сигналы ТВЧ-систем ($E'_R - E'_Y$ и $E'_B - E'_Y$) те же, что в системах PAL.[1] и SECAM[2], но не I' и Q' как в NTSC-системе[3] (см. гл. 22). Четкость цветоразностных сигналов равна половине четкости сигнала яркостного как по горизонтальному, так и по вертикальному направлениям (либо одной четверти яркостного сигнала как в системах PAL. и SECAM., что дает меньшую редукцию яркостного компонента вос-

---

1 Phase Alternation by Line — PAL. Телевизионный стандарт ПАЛ. Формат вещания цветного аналогового телевидения, принятый в странах Европы, в Австралии, Китае и частично в Южной Америке. — *Прим. пер.*

2 Sequentiel [systeme electronique] Couleur avec Memoire (Sequential Color With Memory) — SECAM. Стандарт цветного телевидения, принятый во Франции, странах Восточной Европы, некоторых африканских странах и странах бывшего СССР. — *Прим. пер.*

3 National Television Standards Committee — NTSC. Формат цветного телевидения, принятый в США, Канаде, Южной Корее и Японии. Стандарт был разработан создателем иконоскопа Владимиром Козьмичем Зворыкиным при поддержке телекомпании NBC — *Прим. пер.*

производимых стимулов — см. раздел 19.13). Сверхузкая полоса передачи цветоразностных сигналов достигнута за счет специальных и весьма изощренных алгоритмов компрессии (см. раздел 30.10), что также позволяет передавать цветоразностные сигналы вне полосы сигнала яркостного и что, в свою очередь, дает возможность уйти от появления хроматических «паразитов» в паттернах высокой пространственной частоты (могут возникать в системах с частотным уплотнением — см. раздел 19.9).

Эталонные спектральные чувствительности ТВЧ-телекамер соответствуют трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя по кардинальным стимулам, воспроизводимым современными люминофорами.

Наконец отметим, что популярность систем телевидения высокой четкости по большей части зависит от доступности соответствующих телеприемников.

19.17 СИГНАЛЫ СИСТЕМ ВИДЕОКОМПРЕССИИ

Методы компрессии сигналов, применяемые в телевидении высокой четкости (см. раздел 19.16 и гл. 30), широко используются и в иных сферах, где яркостный и цветоразностный сигналы чаще всего обозначают как Y, C_b и C_r и которые определены, соответственно, как:

$$Y:\quad E'_Y = 0.299E'_R + 0.587E'_G + 0.112E'_B$$

$$C_b:\quad \left(E'_B - E'_Y\right)/1.772 = -0.169E'_R - 0.331E'_G + 0.500E'_B$$

$$C_r:\quad \left(E'_R - E'_Y\right)/1.402 = 0.500E'_R - 0.419E'_G - 0.081E'_B$$

Отметим, что сигналы эти те же, что используются в системах PAL и SECAM (см. гл. 22), за исключением коэффициентов 1.772 и 1.402, ограничивающих C_b- и C_r-сигналы диапазоном ±0.500, тогда как обычно E'_R, E'_G и E'_B лежат в пределах от 0 до 1.0 (см. табл. 22.3).

19.18 ОРГАНИЗАЦИЯ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦИЙ

Бесспорно то, что бизнес-конференциям более всего подходит телевидение, нежели, к примеру, телефонная связь. Вместе с тем, из-за широкой частотной полосы использование стандартных сигналов вещания оказывается затруднительным. В результате для бизнес конференций применяются специально разработанные системы компрессии информации. В одной из таких систем скорость передачи цифровых данных составляет всего 2 Mbps, однако высокое разрешение (в принципе невозможное при таком битрейте) достигается за счет резервирования информации от кадра к кадру и передачей лишь *отличий* между последними (что вполне адекватно типичным бизнес-конференциям) (Nicol и Duffy, 1983).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Bartleson, C.J., and Breneman, E.J., Phot. Sci. Eng., 11, 254 (1967).
Birkinshaw, D.C., J. Roy. Television Soc., 16, 32 (1977).
B.R.E.M.A., Radio and Electronic Engineer, 38, 201 (1969).
Bridgewater, T.H., J. Roy. Television Soc., 16, 25 (1977).
Brown, G., B.B.C. Research Report 1971/4 (1971).

Campbell-Swinton, A.A., Nature, 78, 151 (18 June 1908).
DeMarsh, L.E., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 81, 784 (1972).
DeMarsh, L.E., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 83, 1 (1974).
Fink, D.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 89, 89 and 153 (1980).
Hawker, P., J. Roy. Television Soc., 20, 273 (1983).
Herbert, R.M., J. Roy. Television Soc., 25, 134 (1987).
Herbert, R.M., J. Roy. Television Soc., 27, 23 (1990).
Herman, S., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 84, 267 (1975).
Hunt, R.W.G., J. Roy. Television Soc. 11, 220 (1967).
Jesty, L.C., Wireless World, 63, 304 (1957).
McGee, J.D., Brit. J. Phot., 123, 81 (1976).
Mertz, P., and Gray, F., Bell. Syst. Tech. J., 13, 464 (1934).
Mollon, J.D., and Bowmaker, J.K., Nature, 360, 677 (1992).
Nicol, R.C., and Duffy, T.S., Professional Video, 10, 36 (November, I983).
Novick, S.B., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 342 (1969).
Pitt, I.T., and Winter, L.M., J. Opt. Soc. Amer., 64, 1328 (1974).
Sanders, J.R., J. Roy. Television Soc., 18, 29 (1980).
Shiers, G., J. Roy. Television Soc., 16, 6 (1976).
Sidey, P., Longman, R., Glencross, D., and Pilgrim, A., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 90, 1165 (1981).
Sproson, W.N., private communication (1966).
Wood, D., TV and Video Engineer's Reference Book, pp 29/1–29/10, Butterworth-Heinemann, Oxford (1991).
Yule, J.A.C., Principles of Color Reproduction, Wiley, New York, p. 176 (1967).
Yule, J.A.C., J. Color and Appearance, 2, 30 (1973).

ЛИТЕРАТУРА

Carnt, P.S., and Townsend, G.B., Colour Television: N.T.S.C. Principles and Practice, Iliffe, London, (1961), and Colour Television, VOL. 2, P.A.L., S.E.C.A.M. and Other Systems, Iliffe, London (1969).
Fink, D.G., Color Television Standards, McGraw-Hill, New York (1955).
Gouriet, G.G., An Introduction to Colour Television, The Television Society, London (1955).
Jesty, L.C., J. Television Soc., 7, 488 (1954).
Kaufman, M., and Thomas, H., Introduction to Color T.V., John F. Rider, New York (1954).
Loughren, A.V., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 60, 321 and 596 (1953).
Pearson, D.E., Transmission and Display of Pictorial Information, Pentech Press, London (1975).
Proc. Inst. Radio Engnrs., 39, 1124–1331 (1951).
Proc. Inst. Radio Engnrs., 41, 838–858 (1953).
Proc. Inst. Radio Engnrs., 42, 5–344 (1954).
Proc. Inst. Radio Engnrs., 43, 742–748 (1955).
Sproson, W.N., Colour Science in Television and Display Systems, Adam Hilger, Bristol (1983).
The Television Society, London, A Bibliography of Colour Television (1954).
The Television Society, London, A Bibliography of Colour Television Supplement (1955).
Zworykin, V.K., and Morton, G.A., The Electronics of Image Transmission in Colour and Monochrome, Chapman & Hall, London (1954).

20 ТЕЛЕСЪЕМКА

20.1 ВВЕДЕНИЕ

Телевизионные камеры (телекамеры) выполняют конверсию двухмерной визуальной информации, заключенной в оптическом изображении сцены, в одномерный электрический сигнал. После передачи устройству-приемнику сигнал этот вновь преобразуется в двухмерный, формируя тем самым электронную репродукцию исходного оптического изображения. Конверсия информации из двух размерностей в одну выполняется путем построчного сканирования оптического изображения оригинальной сцены (образованного объективом телекамеры на поверхности того или иного светочувствительного элемента), т.е. процесса, выполняемого в определенной временно́й последовательности.

Телерепродукция сцены восстанавливается телеприемником путем построчной сборки изображения из принятого сигнала, выполняемой в той же временно́й последовательности.

20.2 ПЕРВЫЕ ПЕРЕДАЮЩИЕ ТРУБКИ

Камеры, применявшиеся на заре телевидения (точнее даже в его экспериментальный период) оптическим (либо даже механическим) путем разбивали первичное (оптическое) изображение сцены на серии строк. К примеру, диск, показанный на рис. 20.1, вращавшийся позади объектива камеры, преобразовывал оптическое (первичное) изображение в набор слегка искривленных линий. Однако оптические и механические сканирующие устройства могли дать картинку лишь очень низкой четкости, подчас едва достигавшей 100 lpp (lpp — lines per picture — строк на изображение). Телевидение адекватной четкости, задействующее 400 (и более) строк на изображение, стало возможным благодаря появлению т.н. *иконоскопа*, изобретенного в 1928 г. В.К. Зворыкиным.

20.2.1 Иконоскоп

В иконоскопе электронное изображение сцены формировалось за счет того, что свет, отраженный от ее объектов, падал на тонкий слой слюды, содержащий мозаику активированных зернышек серебра, покрытых цезием или оксидом цезия. Каждое зернышко было отделено от других и работало как микрофотоэлемент. Когда свет воздействовал на этот фотоэлемент, возникала эмиссия электронов, представляющая собой функцию от количества упавшего света и, следовательно, получалось *изображение*, состоящее из электрических зарядов (т.н. *потенциальный рельеф*).

Слой слюды с зернами серебра, который в данном контексте суть т.н. *фотокатод,* сканировался затем пучком электронов высокой скорости (разогнанных потенциалом в 10000 В), что, в свою очередь, вызывало вторичную электронную эмиссию и полный переход электронов с серебряной мозаики на т.н. *коллектор* (сигнальную пластину), выдававший электрический (выходной) сигнал. Однако чем выше уровень экспозиции той или иной области фотокатода, тем ниже уровень вторичной эмиссии электро-

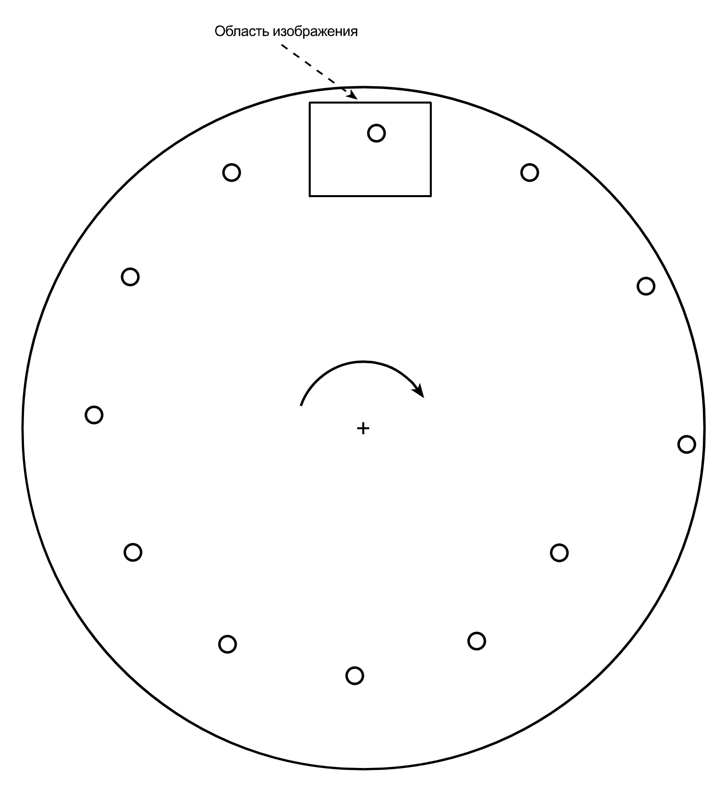


Рис. 20.1 Диск механического сканирования, применявшийся на заре телевидения.

нов (поскольку большее их количество ушло при эмиссии первичной) и тем ниже результирующий ток коллектора. То есть, мы говорим, что катодный ток представляет собой функцию от разности уровней световой экспозиции соседних участков электронного изображения, т.е. функцию от разности потенциалов соседних участков потенциального рельефа.

В грубом приближении, изменение силы тока пропорционально корню квадратному изменения фотометрической яркости, и, хотя нелинейное соотношение, на первый взгляд, нежелательно, мы знаем, что светоотдача телеприемников, выполненных на базе ЭЛТ, примерно пропорциональна квадрату (или кубу) приложенного сигнала. Сказанное означает, что гамма тонопередачи связки двух устройств (камеры и приемника) будет либо линейной, либо степенной с коэффициентом 1.5 (последнее необходимо для телепросмотра в темном окружении, что уже обсуждалось в гл. 6).

Наконец отметим, что у передающих трубок всех телекамер различные компоненты иконоскопа помещены в вакуумную колбу.

20.2.2 Супериконоскоп

Светочувствительность т.н. *супериконоскопа,* пришедшего на смену иконоскопу, выше чем светочувствительность последнего, чего удалось добиться за счет формирования оптического изображения на полупрозрачном фотокатоде и следующей за этим бомбардировкой пучком разогнанных электронов т.н. *мишени передающей трубки.* Понятно, что интенсивность бомбардировки мишени согласуется с фотометрическими яркостями элементов передаваемого изображения.

В результате бомбардировки возникает т.н. *вторичная эмиссия электронов* (то есть,

эмиссия уже из мишени), и поэтому, когда начинается процесс сканирования мишени потоком быстрых электронов, ток коллектора представляет собой функцию от изменения фотометрической яркости соседних элементов оптического изображения, то есть также, как в иконоскопе.

20.2.3 Иконоскоп и супериконоскоп в цветном телевидении

Важно отметить, что иконоскоп и супериконоскоп не подходят цветному телевидению, поскольку неуправляемые вторичные электроны искажают краевые контрасты (которые должны представлять собой функцию от фотометрических яркостей соседних областей изображения). Коль скоро распределение яркостей в трех кардинальных изображениях различно, искажения эти также будут различны, вследствие чего на воспроизводимом изображении возникнут различные хроматические «паразиты».

20.2.4 Ортикон

Первое общественное телевидение адекватной четкости, начавшее в 1936 г. вещание из лондонской студии BBC, строилось на передающих трубках различных типов, представлявших собой независимую разработку команды Дж. Д. Мак-Ги (EMI) под общим названием «Эмитрон» («Emitron»). Усовершенствованный вариант Эмитрона, известный как CPS-Emitron (cathode-potential-stabilized) или «Ортикон» появился лишь 10 лет спустя.

На рис. 20.2 показаны основные узлы *ортикона*: изображение сцены формируется на тонком листке слюды, имеющем на своей передней поверхности прозрачный проводящий слой, а на задней — слой светочувствительный. Фотоэлектроны, испущенные задней поверхностью, собираются на аноде, формируя потенциальный рельеф (т.е. изображение из электрических зарядов). Рельеф сканируется пучком слабо разогнанных электронов, энергии которых хватает лишь на то, чтобы заполнить светочувствительный слой в тенях регистрируемой сцены. Света сцены при этом остаются положительно заряженными (что вызвано недостатком фотоэлектронов), позволяя тем самым сканирующему лучу восполнить этот недостаток. В результате токи, идущие от электронных пушек к светочувствительному слою, становятся функцией от фотометрической яркости элементов оптического изображения сцены. Колебания силы этих токов

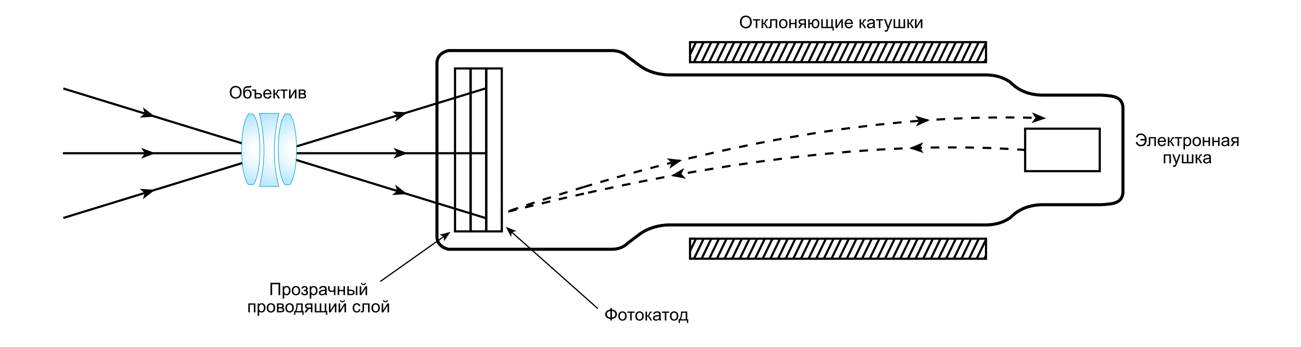


Рис. 20.2 Типичный ортикон (CPS-Emitron). Сплошные лини — свет; пунктирные — электроны.

вызывают колебания потенциала на прозрачном проводящем слое, что и представляет собой сигнал передаваемого изображения.

Отметим, что в трубках данного типа не возникает локальных тоноискажений, свойственных иконоскопу, однако чувствительность ортиконов слишком мала для их эффективного использования в цветных телекамерах.

Отметим также, что взаимоотношения между фотометрической яркостью элементов оптического изображения сцены и сигналом ортикона полностью линейные и это означает, что перед отправкой на приемник сигнал этот должен быть подвергнут гамма-предыскажению (Benson, 1981).

20.3 ПЕРЕДАЮЩИЕ ТРУБКИ ЦВЕТНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

20.3.1 Суперортикон

На рис. 20.3 показаны основные узлы т.н. *суперортикона*, в котором действуют как супериконоскоп, дающий низкоэнергетичный сканирующий луч (т.е., реализующий этап электронного изображения), так и т.н. *фотоэлектронный умножитель*, необходимый для повышения чувствительности устройства.

Оптическое изображение сцены у суперортикона формируется на светочувствительном слое (фотокатоде) и поток электронов, им испущенных, фокусируется сообразно изображению на специальной «мишени», представляющей собой сверхтонкую стеклянную мембрану со сверхмелкоячеистой металлической сеткой. Последняя расположена параллельно мембране и очень плотно прилегает к ней со стороны хода электронов.

Фотоэлектроны вызывают вторичную электронную эмиссию с поверхности мембраны, а испущенные электроны собираются на проволочной сетке. При этом заметим, что стекло настолько тонкое, что результирующий зарядовый паттерн возникает по обе стороны этого стекла. Когда стеклянная мембрана сканируется электронным лучом низкой энергии, наполнение мишени электронами будет представлять собой функцию от фотометрической яркости элементов изображения сцены, то есть, как в обычном ортиконе. Следовательно, изменения фотометрической яркости изображения сцены вызывают изменения электронно-лучевого тока, который, возвращаясь от мишени, запускает первый этап работы пятистадийной трубки фотоэлектронного умножителя.

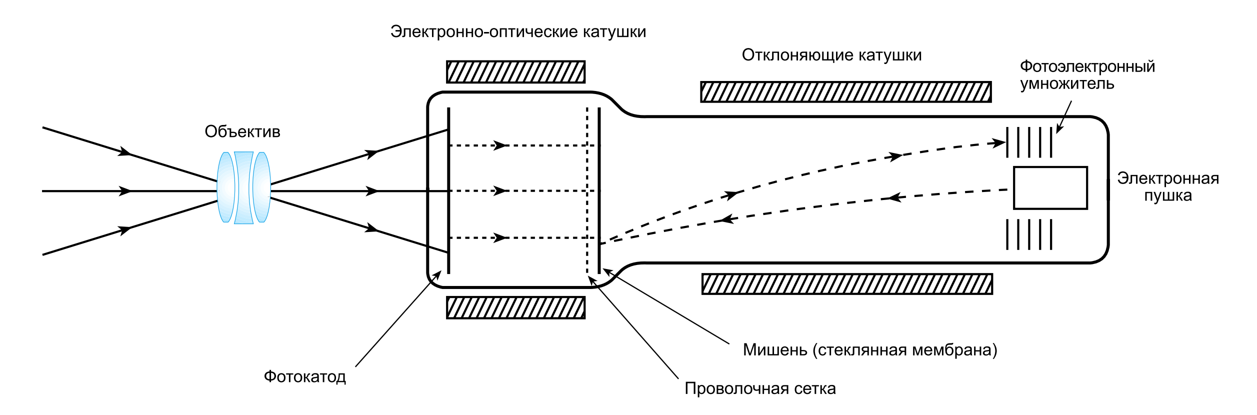


Рис. 20.3 Суперортикон. Сплошные лини — свет; пунктирные — электроны.

20.3.1.1 Светочувствительность

Чувствительность трубки суперортикона очень высока и позволяет получать высококачественные черно-белые изображения сцен с освещенностью вплоть до 20 лк.

Подобно ортикону суперортикон дает полностью линейный отклик, но на достаточно высоких уровнях фотометрической яркости возникает момент насыщения: проволочная сетка перестает принимать вторичные электроны и отклик устройства выравнивается (Neuhauser, 1956). Вторичные электроны, не задержанные сеткой, летят назад к мишени и создают области с отрицательным зарядом (что в свою очередь приводит к появлению на изображении черных ореолов вокруг очень ярких объектов сцены, таких как, к примеру, источники света).

В цветном телевидении характер описанных дефектов у каждого из кардинальных трихроматических изображений различен, что ведет к появлению неприемлемых хроматических «паразитов», и в результате чего трубки вынуждены работать только на участке ниже сгиба («излома») их характеристической кривой.

20.3.1.2 Динамический диапазон

Диапазон фотометрических яркостей объектов сцены (динамический диапазон), в котором суперортикон отвечает линейно, составляет примерно 90:1 и выражается как отношение максимального уровня сигнала к среднеквадратичному шуму. В логарифмических единицах данная величина будет составлять 1.95 или же 39 дБ.[1] На практике, однако, необходимость гамма коррекции и т.н. *апертурной коррекции* (повышающих амплитуду высокочастотных сигналов для компенсации снижения контраста между мелкими деталями изображения — эффекта зависящего от диаметра сечения или, как говорят, «апертуры» электронного пучка — см. раздел 20.12) обычно приводит к снижению отношения «максимальный уровень сигнала/шум» на малых уровнях сигнала.

20.3.2 Видикон

На рис. 20.4 показаны основные узлы *видикона*. Оптическое изображение сцены формируется на тонком слое фотопроводника, плотно прилегающего со стороны падения света к прозрачному проводящему слою, который несет на себе заряд, положительный по отношению к электронной пушке, расположенной с противоположной стороны этого слоя. В результате, при отсутствии световой энергии фотопроводник работает как диэлектрик, не давая идти току от пушки к прозрачному проводящему слою. Но под воздействием света, фотопроводящий слой начинает пропускать электрический ток, в результате чего электроны начинают движение в сторону прозрачного проводящего слоя и, следовательно, потенциал поверхности фотопроводника растет как функция от фотометрической яркости падающего света. Затем сканирующий

---

[1] В электротехнике энергия пропорциональна *квадрату* напряжения (или тока), поэтому изменение на одну логарифмическую единицу (десятичный логарифм) напряжения (или тока) равно двенадцати (не десяти) децибел. В телевидении, если выходное напряжение (или ток) преобразователя рассматривать как *прямо* пропорциональное количеству света, для получения соответствующего изменения количества света в логарифмических единицах данное изменение в напряжении (или силе тока), выраженное в децибелах, должно быть разделено на 12. И наоборот: для получения соответствующего изменения напряжения (или тока) в децибелах логарифмическое изменение количества света должно быть умножено на 12.

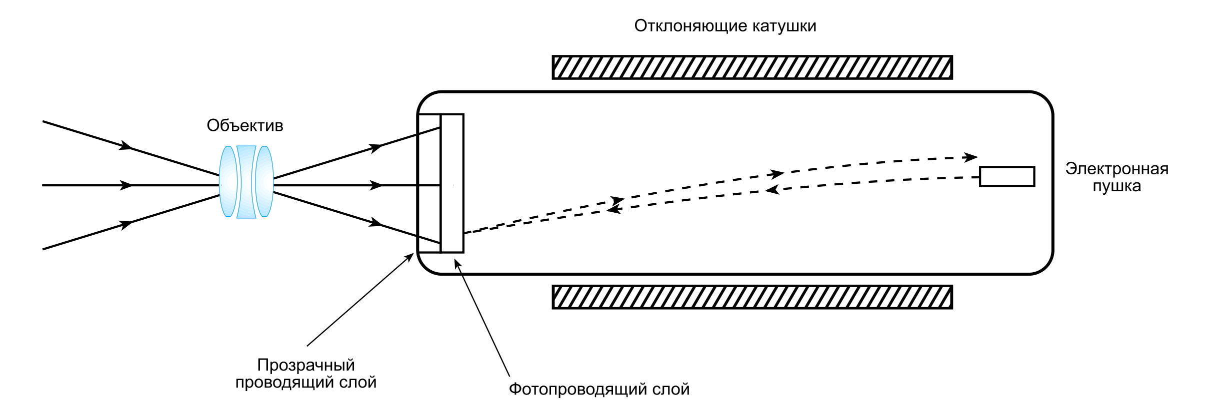


Рис. 20.4 Видикон. Сплошные лини — свет; пунктирные — электроны.

электронный пучок выбивает электроны, тем самым еще раз снижая заряд согласно уровню фотометрических яркостей элементов оптического изображения сцены, и, следовательно, токи, идущие в направлении прозрачного проводящего слоя, образуют тем самым требуемый сигнал.

20.3.2.1 Светочувствительность

Мы видим, что конструкция видикона несколько проще, чем суперортикона, но при этом видикон и менее чувствителен: для получения высококачественных черно-белых изображений сцен с помощью последнего необходима освещенность этих сцен порядка 500 люкс.

20.3.2.2 Динамический диапазон

В отличие от ортикона, динамический диапазон видикона полностью адекватен регистрируемым сценам и составляет 300:1 (50 дБ), хотя неизбежная апертурная коррекция часто снижает его до 100:1 (40 дБ).

20.3.2.3 Функция отклика

Характеристики отклика видикона примерно те же, что и у иконоскопов: выходной сигнал примерно пропорционален корню квадратному из фотометрической яркости падающего света (следовательно, когда видикон работает в связке с приемником, построенном на электронно-лучевой трубке, требуется некоторая гамма коррекция). Однако, в отличие от иконоскопов отклик видикона не зависим от локальных колебаний фотометрической яркости.

На рис. 20.5 в логарифмических осях даны кривые отклика типичного видикона (Neuhauser, 1956): наклон прямой, аппроксимирующей эти кривые, соответствует коэффициенту контрастности (гамма) примерно 0.5. Коэффициент контрастности типичного видикона, как правило, лежит в диапазоне 0.5-0.6.

Отметим, что линии рис. 20.5 получены простым изменением разности потенциалов между прозрачным проводящим слоем и электронной пушкой, что, кстати говоря, представляет собой очень удобный и высокочувствительный механизм управления видиконом (к примеру, в камерах цветного телевидения такой механизм может использоваться для выравнивания трех сигналов по белому стимулу сцены).

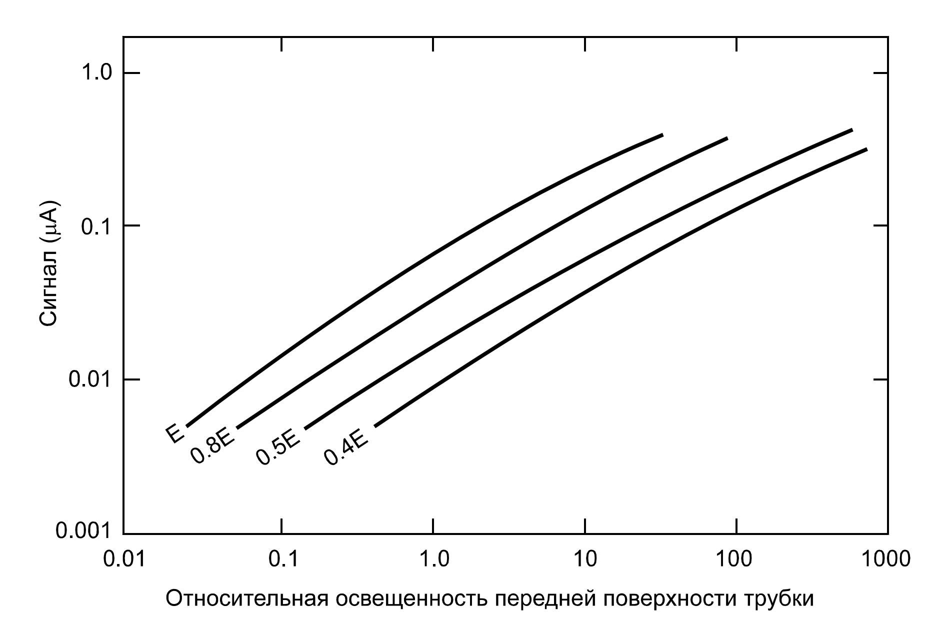


Рис. 20.5 Кривые откликов видикона при четырех вариантах величины разности потенциалов (E, $0.8E$, $0.5E$ и $0.4E$, где E — максимально возможное значение) между прозрачным проводящим слоем и электронной пушкой.

Стоит сказать, что у видикона очень низкий и стабильный темновой ток (что крайне важно для камер цветного телевидения), но, вместе с тем, теневые и черные объекты иногда передаются с паразитной хроматической подцветкой. Фактически все тонопередающие характеристики видикона очень стабильны и линейны (в логарифмических осях) и свободны от каких-либо «изломов», свойственных суперортиконам.

20.3.2.4 Таймлаг

Вдобавок к ограниченной чувствительности, у видикона есть еще один существенный недостаток: трубка дает ощутимый *таймлаг* (время запаздывания), приводящий к легкому смазыванию изображения. При этом время запаздывания зависит от уровня освещенности сцены и при 1000 лк (и выше) это смазывание практически незаметно.

20.3.2.4 Область применения

Наконец отметим, что видикон с его широким и стабильным динамическим диапазоном весьма хорош для получения телесигналов с изображений, выполненных на фото- и кинопленках (кинотелепроекция). Плюс к тому, видиконовые трубки компактнее ортиконов и, следовательно, позволяют конструировать весьма компактные камеры.

20.3.3 Плюмбикон

Плюмбиконовая трубка (*плюмбикон*) работает строго по тем же принципам, что и видикон (De Haan и Van Doorn, 1964), однако фотопроводник в плюмбиконе изготавливается не из сульфида сурьмы (Sb_2S_3) или селена (Se), а из моноксида свинца (PbO).

20.3.3.1 Светочувствительность

Светочувствительность плюмбикона лежит примерно по середине между чувствительностями суперортикона и видикона: высококачественные черно-белые изображения сцен можно получить при уровнях их освещенности ниже 100 лк.

20.3.3.2 Функция отклика

Гамма кривой отклика плюмбикона (см. рис. 20.6) примерно равна 1.0, поэтому обычно требуется гамма коррекция. Тонопередающая характеристика, линейна и не зависит от уровня освещенности сцены, локальных яркостных отличий, рабочего напряжения и внешней температуры. Темновой ток очень низкий.

20.3.3.3 Динамический диапазон

Динамический диапазон составляет 80:1 (38 дБ) при освещенности сцены в 1500 лк и 65:1 (36 дБ) при 250 лк.

20.3.3.4 Рабочая область изображения

Рабочая область изображения очень мала — 12×16 мм (или даже меньше), благодаря чему могут использоваться объективы с очень большой относительной апертурой (малыми значениями диафрагм — *Прим. пер.*) без каких-либо серьезных потерь глубины резкости (см. раздел 18.11) и благодаря чему камеры могут изготавливаться очень компактными.

20.3.3.5 Таймлаг

Таймлаг плюмбикона практически равен нулю (за исключением очень низких освещенностей).

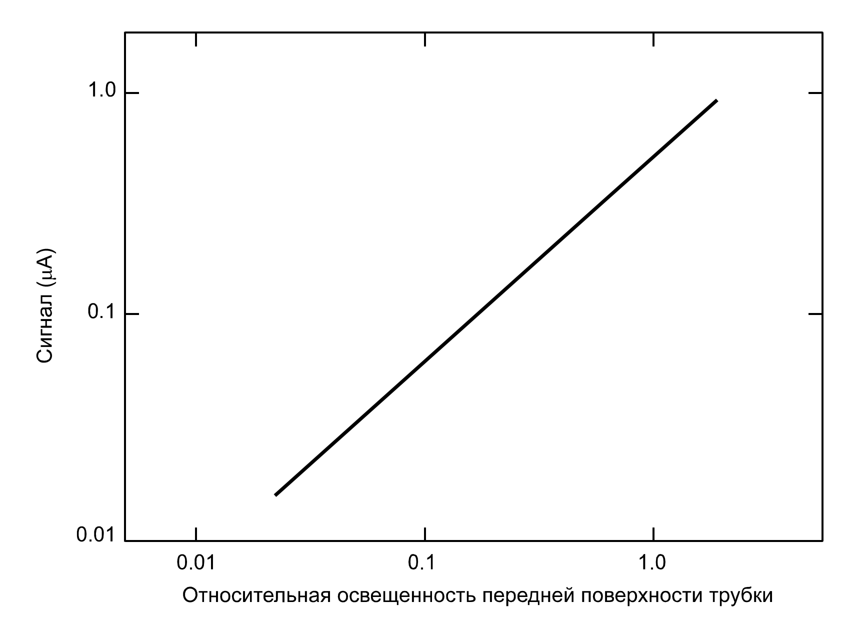


Рис. 20.6 Характеристическая кривая отклика плюмбикона.

20.3.3.6 Область применения

В целом плюмбиконовая трубка вполне подходит для конструирования камер цветного телевидения.

20.3.4 Сатикон

Трубка, в которой фотопроводник построен на основе смеси селена, мышьяка и теллура, получила название «Сатикон» и тоже нашла применение в телевидении.

Свойства сатикона примерно те же, что и у плюмбикона, но таймлаг на низких освещенностях ощутимо меньше (Benson, 1981).

20.4 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕДАЮЩИХ ТРУБОК

Очевидно, что спектральные чувствительности трубочных цветных телекамер должны распространяться на весь видимый спектр, но при этом точная форма исходных кривых спектральной чувствительности передающих трубок не критична, поскольку требуемых кривых легко добиться подбором фильтров (см. раздел 19.12).

На рис. 20.7 даны типичные кривые спектральной чувствительности ортикона, видикона и плюмбикона. Мы видим, что относительная чувствительность всех трубок в коротковолновой («синей») части спектра больше чем в длинноволновой («красной»); однако синие фильтры обычно менее эффективны, чем красные, да и условия тусклого освещения, часто возникают именно при свете ламп накаливания, в спектре которых крайне мало коротковолнового компонента. В результате в камерах цветного телевидения «красный» и «синий» каналы имеют примерно одинаковые эффективные чувствительности, но при этом несколько бóльшую у «зеленого».

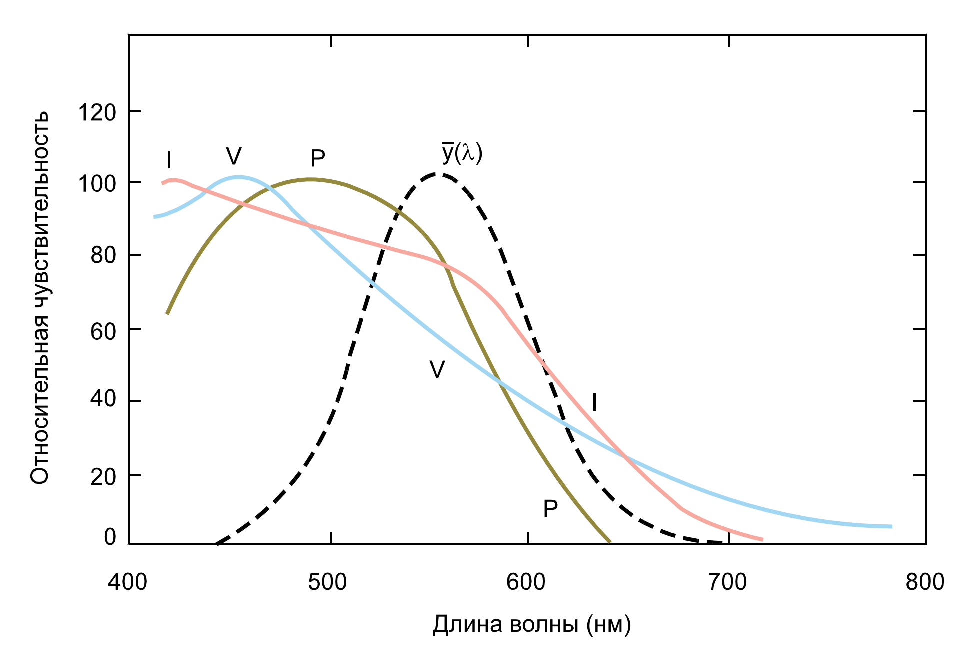


Рис. 20.7 Кривые спектрального отлика: «I» — суперорикона; «V» — видикона; «P» — плюмбикона; «$\overline{y}(\lambda)$» — зрительной системы человека (функция фотопической световой эффективности).

Чувствительность обычного плюмбикона в длинноволновом конце спектра снижена в том числе и для того, чтобы обеспечить точность регистрации стимулов, спектральное распределение которых лежит в «красной» области спектра за пределами 640 нм. Однако того же позволяет добиться и матрицирование, по крайней мере в отношении большинства стимулов сцен, встречающихся в реальной практике (Monteath, 1966).

Отметим также, что встречаются плюмбиконы с повышенной чувствительностью в дальнем длинноволновом конце спектра (De Haan и Van Doorn, 1965).

20.5 (ПЗС-) CCD-МАТРИЦЫ

Несмотря на то, что телевизионные передающие трубки, описанные выше, — это сенсоры, на базе которых развивалось телевидение, — современные *CCD-сенсоры* (то есть *приборы с зарядовой связью* — Charge-Coupled Device) являют собой весьма заманчивую альтернативу трубочным телекамерам.

CCD-сенсор представляет собой маленькую кремниевую ячейку, испускающую электроны под воздействием световой энергии. В т.н. *CCD-линейке* (*линейной CCD-матрице*) CCD-ячейки расположены в линию и плотно прилегают друг к другу. После световой экспозиции заряды из разных ячеек начинают движение вдоль линейки от одной ячейки к другой, так что на конце этой линейки временнáя последовательность зарядов несет информацию о позициях ячеек того или иного заряда в этой линейке.

Совокупность CCD-линеек, плотно прилегающих друг к другу, образует *CCD-матрицу*. Считывая заряды из каждой линейки в определенной временной последовательности, мы получим повременно-зависимый сигнал, описывающий всю матрицу, то есть — отклик телевизионного типа.

Частота т.н. *тактового выхода сигналов* CCD-матрицы должна строго соответствовать специфике данной телевизионной системы, включая чересстрочную развертку (если таковая применяется).

Наконец отметим, что размер одного пиксела обычно равен всего лишь 0.01 мм^2, благодаря чему CCD-матрица — это весьма и весьма компактное устройство.

20.5.1 Разрешающая способность CCD-матриц

Разрешающая способность CCD-матрицы зависит от общего количества ячеек (элементов или *пикселов*). Чем больше пикселов — тем выше разрешающая способность результирующих электронных изображений. Вместе с тем, увеличение числа пикселов прогрессивно повышает стоимость матрицы, особенно когда дозволенное количество «битых» ячеек очень мало.

20.5.1.1 Телевидение стандартной четкости

Для стандартного широковещательного телевидения число линеек в матрице должно быть равно числу телевизионных строк, а количество пикселов в каждой линейке — числу строк, умноженных на формат изображения. К примеру, для системы в 525 строк при 483 активных строках CCD-матрица должна иметь 483×(4/3)483 или 483×644 пиксела, то есть — 311052; для системы в 625 строк при 575 активных строках число пикселов должно равняться 575×(4/3)575 или 575×767 пиксела, то есть — 441025.

20.5.1.2 Любительское видео

В любительских видеокамерах количество пикселов можно уменьшить, обычно до 240×320 (всего 76800), и тем понизить стоимость аппарата.

20.5.1.3 ТВЧ-системы

В телевизионных системах высокой четкости (см. раздел 19.16), имеющих 1080 активных строк изображения при формате 16×9, общее число пикселов должно быть равным 1080×(16/9)1080 или 1080×1920, то есть — 2073600. Для цветных телепередач это число обычно умножается на 3 (или, как минимум на 2 — см. рис. 20.9).

20.5.1.4 Цифровая фотография

Цифровым фотокамерам требуется весьма большое разрешение матриц, к примеру, если мы захотим достичь разрешающей способности обычной 35 мм фотокамеры, то понадобится 2400×3600 (8640000) пикселов для монохромной регистрации сцен и 2400×3600×3 (8640000×3), то есть, 24 млн. — для трихроматической.

Если камера используется для регистрации исключительно статичных сцен, понадобится лишь 8 млн. пикселов, поскольку трихроматические сигналы можно записать последовательно через красный, зеленый и синий фильтры. Последние можно смонтировать на медленно вращающемся диске. Камера такого типа может применяться, к примеру, для оцифровки документов, в метрологии, системах машинного зрения, медицинских целях, микроскопии, космической фотографии и пр.

20.6 УСТРОЙСТВО ТЕЛЕКАМЕР

20.6.1 Светоделение

Как давеча было показано, для регистрации сугубо статичных сцен может использоваться единичная трубка (или CCD-матрица), последовательно фиксирующая сцену через красный, зеленый и синий фильтры. Однако чаще всего кардинальные трихроматические изображения должны регистрироваться одновременно, и наиболее удобным путем достижения сего является деление света на «красный», «зеленый» и «синий» компоненты, выполняемое уже *после того*, как свет этот пройдет через объектив телекамеры. Для реализации этой идеи чаще всего используются т.н. *светоделительные призмы* (см. рис. 20.8), расположенные либо перед плюмбиконом, либо перед CCD-сенсором.

После попадания в призму свет вначале сталкивается с т.н. *дихроичным* (*интерференционным*) *зеркалом*, отражающим коротковолновый («синий») свет и пропускающим средне- и длинноволновый («зеленый» и «красный»). Средне- и длинноволновый свет попадает затем на второе дихроичное зеркало, отражающее «красный», но пропускающее при этом на соответствующий сенсор «зеленый» свет. Коротковолновый («синий») и длинноволновый («зеленый») компоненты отражаются затем от двух других поверхностей и попадают каждый на свой сенсор. Отметим, что благодаря такому устройству камера может стать очень компактной.

Для выполнения т.н. *спектральной чистки* трихроматических потоков перед соответствующими сенсорами можно расположить красный, зеленый и синий стеклянные (или желатиновые) фильтры (Van Doorn, De Lang и Bouwis, 1966; Davenport, 1985; Oshima, 1988).

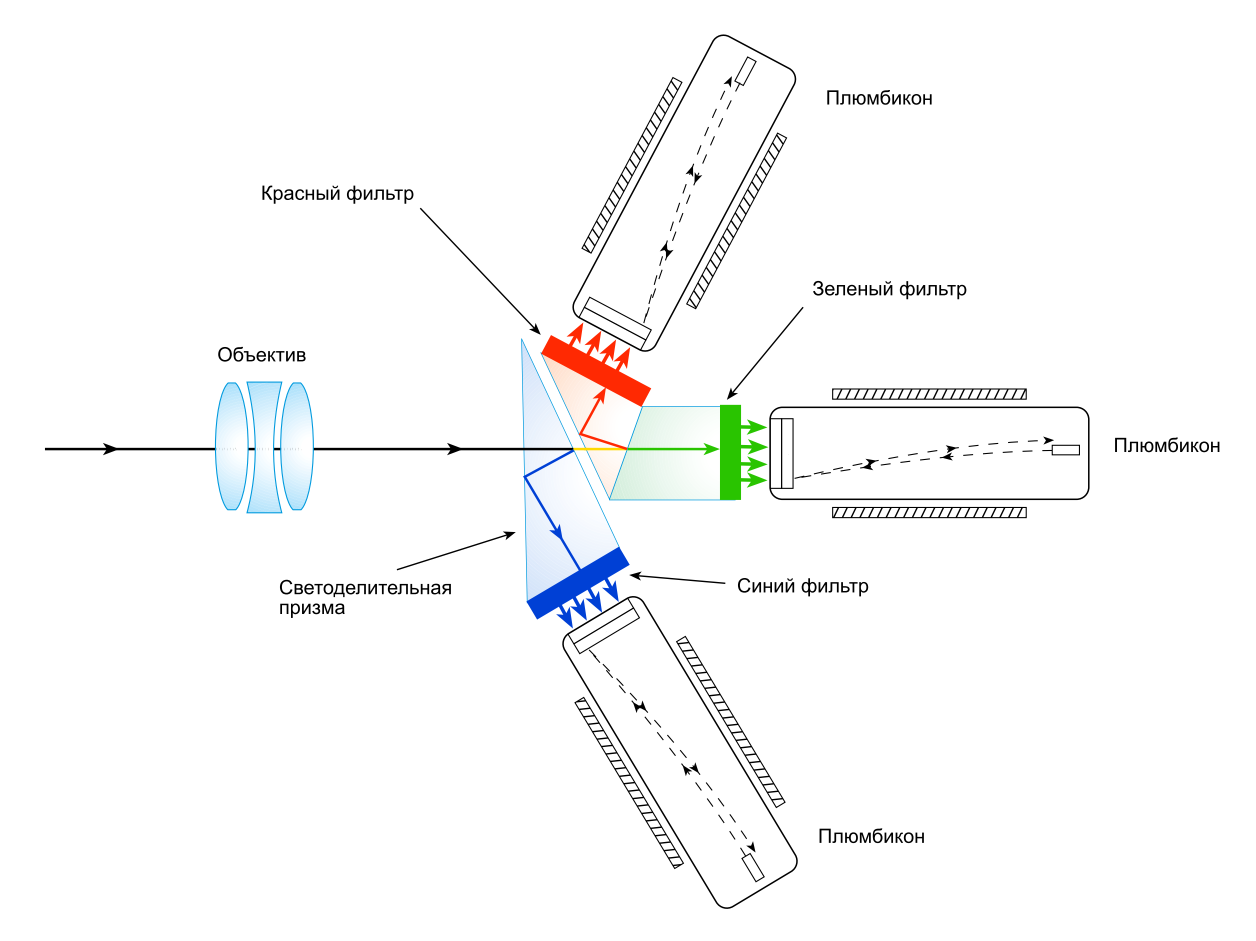


Рис. 20.8 Схема устройства трехплюмбиконовой телекамеры.

В CCD-матрицах каждый пиксел бывает покрыт либо красным, либо зеленым, либо синим фильтрами (см. рис. 20.9), поэтому матрицу используют без каких-либо дополнительных оптических элементов (Dillon, Lewis и Kaspar, 1978).

По рис. 20.9 хорошо видно, что в CCD-матрицах «зеленых» ячеек в два раза больше, чем «красных» и «синих»: так сделано затем, чтобы вклад «зеленого» сигнала в сигнал яркостный был больше, чем соответствующий вклад «красного» и тем паче «синего» сигналов (см. рис. 22.3, а также гл. 31).

20.6.2 Спектральные чувствительности сенсоров

Факторы, влияющие на выбор поканальных спектральных чувствительностей у телекамер, построенных на базе CCD-матриц, отличны от таковых у камер, использующих дихроичные светоделительные устройства: элементы матрицы не столь спектрально селективны (т.е. кривые их спектральной чувствительности шире) и, следовательно, более эффективны (см. раздел 20.11), что в большей степени роднит их с мозаикой фоторецепторов сетчатки глаза. Следовательно, накладка кривых спектральной чувствительности друг на друга, которая соответствует полностью положительным трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя, может использоваться без потери светочувствительности и каких-либо вспомогательных голубых, пурпурных, желтых или бесцветных фильтров (см. раздел 31.2). Однако, коль скоро кривые спек-

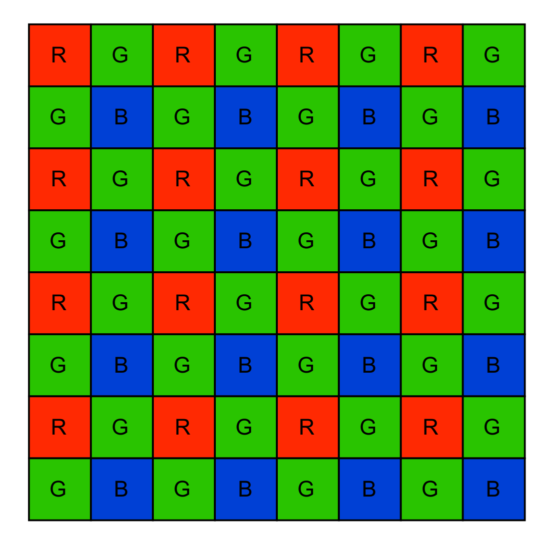


Рис. 20.9 Небольшой фрагмент паттерна RGB-фильтров, используемых с CCD-сенсорами.

тральной чувствительности расширены, требуемые матричные коэффициенты оказываются выше, что ухудшает соотношение сигнал/шум и в результате чего возникает необходимость в поиске определенных технологических компромиссов.

20.7 ТОНАЛЬНОЕ ВЫРАВНИВАНИЕ ТРИХРОМАТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Тональный баланс кардинальных трихроматических изображений, фиксируемых телекамерой, сконструированной на базе трех раздельных сенсоров, должен быть одинаковым, и поэтому:

— уровни паразитной подсветки всех световодов камеры должны быть практически одинаковыми;

— каждый из трех сенсоров должен иметь одинаковые чувствительность и тонопередающие характеристики по всей области изображения — в противном случае возникает т.н. *паразитная подцветка* результирующего изображения (хотя, конечно, в дальнейшем к последнему можно применить некоторую электронную коррекцию);

— тонопередающие характеристики трех типов сенсоров должны быть максимально уравнены между собой — в противном случае серая шкала будет воспроизводиться с неравномерной паразитной подцветкой (если, конечно, в дальнейшем не будет выполняться соответствующая коррекция).

Плюс к тому, когда изображения, сформированные на поверхности сенсоров, оказываются геометрически неидентичными, четкость результирующего изображения падает, а вокруг его элементов появляются паразитные хроматические контуры (т.н. *паразитное хроматическое оконтуривание*).

Итак, мы видим, что для создания цветной телекамеры, требуется высочайшая прецизионность ее электронных и оптических элементов, а также высокая механическая прочность последних.

Наконец отметим, что при совместном использовании CCD-матриц и светоделительных блоков трихроматические электронные изображения должны быть очень точно приведены друг к другу.

20.8 RYB-КАМЕРЫ

Коль скоро вклад коротковолнового «синего» сигнала в сигнал яркостный минимален (не превышает 10%) — это обстоятельство можно использовать в решении проблемы обеспечения должной четкости транслируемых изображений. Проще говоря, идеальная по критерию четкости камера должна выдавать не трихроматические сигналы («красный», «зеленый» и «синий»), но «красный», яркостный и «синий». Оптическое решение такой камеры не представляет трудности и требует лишь того, чтобы зеленый фильтр был достаточно широким по своей спектральной полосе, дабы пропускал небольшое количество длинноволнового («красного») и коротковолнового («синего») света (благодаря чему спектральная чувствительность яркостного канала аппроксимировала бы кривую фотопической световой эффективности [$\bar{y}(\lambda)$]).

Проблема прецизионного пространственного совмещения электронных изображений сцены в этом случае компенсируется тем, что одно из трех оптических изображений регистрируется с высокой четкостью, и неприводка по двум другим обнаруживается лишь тогда, когда разрешение по яркостному каналу оказывается столь же низким, как и по цветоразностным.

Однако практический успех обсуждаемой идеи оказался не столь очевиден, как ожидалось, поскольку зрение крайне чувствительно к контурным хроматическим «паразитам», возникающим на границах между элементами изображения: допуск на неприводку у RYB-телекамер получился всего лишь в два раза бóльшим, чем у обычных RGB-камер (вместо ожидавшегося четырехкратного), что не оправдало надежд на существенную экономию полосы.

Отметим, что при использовании светоделительных устройств деление информации о свете на яркостную, «красную» и «синюю» составляющие также несколько снижает световую эффективность соответствующих сигналов (см. раздел 20.11).

20.8.1 Гамма коррекция

Генерация камерой отдельного яркостного сигнала усложняет ситуацию в контексте разговора о контрастности: перед началом передачи яркостный сигнал (E_Y) должен быть подвергнут гамма коррекции до $E_Y^{1/\gamma}$ и, следовательно, станет соотноситься с «красным», «зеленым» и «синим» сигналами (E_R, E_G и E_B) как:

$$E_Y^{1/\gamma} = \left(lE_R + mE_G + nE_B\right)^{1/\gamma}$$

где l, m и n — яркостные константы.

Два других сигнала будут представлять собой, соответственно, $E_R^{1/\gamma} - E_Y^{1/\gamma}$ и $E_B^{1/\gamma} - E_Y^{1/\gamma}$, и, хотя восстановить $E_R^{1/\gamma}$ и $E_B^{1/\gamma}$ легко (добавкой $E_Y^{1/\gamma}$ к каждому), восстановление $E_G^{1/\gamma}$ — это довольно сложная процедура, требующая того, чтобы сигнал вначале был возведен в степень γ, добавлен, отнят, а затем возведен в степень $1/\gamma$. Дополнительная сложность состоит еще и в том, что операция эта должна выполняться в приемнике (что повышает его стоимость и снижает соотношение «полезный сигнал/шум»).

В результате гамма коррекция при использовании RYB-камеры выполняется иным путем, то есть существуют различные упрощенные схемы восстановления приблизительного $E_G^{1/\gamma}$-сигнала в телеприемнике, к примеру: если последовательность операций была та же, что и при нормальном яркостном сигнале ($E'_Y = lE_R^{1/\gamma} + mE_G^{1/\gamma} + nE_B^{1/\gamma}$), то восстановление фактического «зеленого» сигнала ($E_g^{1/\gamma}$) можно выполнить как:

$$E_g^{1/\gamma} = E_Y^{1/\gamma} - \frac{1}{m}\left(E_R^{1/\gamma} - E_Y^{1/\gamma}\right) - \frac{n}{m}\left(E_B^{1/\gamma} - E_Y^{1/\gamma}\right).$$

Коль скоро $l + m + n = 1$, то:

$$E_g^{1/\gamma} = \frac{1}{m}E_Y^{1/\gamma} - \frac{1}{m}E_R^{1/\gamma} - \frac{n}{m}E_B^{1/\gamma}.$$

Поскольку:

$$-\frac{1}{m}E_R^{1/\gamma} - \frac{n}{m}E_B^{1/\gamma} = E_G^{1/\gamma} - \frac{1}{m}E'_Y,$$

мы получим:

$$E_g^{1/\gamma} = E_G^{1/\gamma} + \frac{1}{m}\left(E_Y^{1/\gamma} - E'_Y\right).$$

Для серых стимулов выражение $E_Y^{1/\gamma} - E'_Y$ равно нулю, но для стимулов хроматических — оно всегда положительно. Следовательно, «зеленые» сигналы оказываются искаженными, точнее — неоправданно растут по мере роста колориметрической чистоты стимулов сцены. В результате, приемником, зеленые стимулы воспроизводятся с повышенной колориметрической чистотой, тогда как красные и синие — с пониженной и вдобавок сдвинутыми по доминирующей длине волны. Сей недочет можно частично компенсировать вычитанием из $E_g^{1/\gamma}$ такого сигнала, который будет представлять собой функцию от колориметрической чистоты, чего достигают с помощью т.н. *спрямления цветоразностного сигнала* (James и Karowski, 1962), но при этом всегда ценой усложнения конструкции телеприемника.

Учитывая все вышеперечисленные сложности, предпочтительно, чтобы при использовании RYB-телекамер E_G-сигнал низкой четкости восстанавливался из E_R-, E_B- и E_Y-сигналов *в передатчике*.

В следующем разделе мы покажем, что с помощью соответствующей обработки этих сигналов *до* передачи, корректные сигналы можно восстановить без каких-либо дополнительных усложнений конструкции телеприемника и без какой-либо утраты тех преимуществ, что дает отдельный яркостный сигнал высокой четкости.

20.9 ЧЕТЫРЕХСЕНСОРНЫЕ (RGBY-) ТЕЛЕКАМЕРЫ

Сложности с восстановлением «зеленого» сигнала при использовании RYB-телекамер проявляют себя в несколько иной форме, когда в качестве дополнительного к трихроматическим сигналам телекамеры, используется отдельный яркостный сигнал, получаемый за счет четвертого сенсора. В специальной RGBY-телекамере цветоразностные сигналы рассчитываются обычным путем из сигналов красночувствительного, зеленочувствительного и синечувствительного сенсоров, образуя вначале сигнал E'_Y:

$$E'_Y = lE_R^{1/\gamma} + mE_G^{1/\gamma} + nE_B^{1/\gamma},$$

с последующим вычитанием этого сигнала из $E_R^{1/\gamma}$- и $E_B^{1/\gamma}$-сигналов:

$$E_R^{1/\gamma} - E'_Y$$
$$E_B^{1/\gamma} - E'_Y$$

Четвертый сенсор используется для обеспечения истинного гамма откорректированного яркостного сигнала $E_Y^{1/\gamma}$. Как правило, только этот сигнал обладает высокой четкостью, тогда как красночувствительный, зеленочувствительный и синечувствительный сенсоры, организующие, в конечном итоге, лишь сигналы цветоразностные, могут обладать гораздо меньшим уровнем четкости и, следовательно, требуют гораздо меньшей точности приводки электронных изображений. Приемник затем восстановит требуемые трихроматические сигналы $E_R^{1/\gamma}$, $E_G^{1/\gamma}$ и $E_B^{1/\gamma}$, однако коль скоро $E'_Y \neq E_Y^{1/\gamma}$, трихроматические сигналы будут восстановлены им в модифицированном виде $E_{MR}^{1/\gamma}$, $E_{MG}^{1/\gamma}$ и $E_{MB}^{1/\gamma}$, то есть:

$$E_{MR}^{1/\gamma} = E_R^{1/\gamma} - E'_Y + E_Y^{1/\gamma} = E_R^{1/\gamma} + \left(E_Y^{1/\gamma} - E'_Y\right)$$

$$E_{MB}^{1/\gamma} = E_B^{1/\gamma} - E'_Y + E_Y^{1/\gamma} = E_B^{1/\gamma} + \left(E_B^{1/\gamma} - E'_Y\right)$$

$$E_{MG}^{1/\gamma} = E_Y^{1/\gamma} - \frac{l}{m}\left(E_R^{1/\gamma} - E'_Y\right) - \frac{n}{m}\left(E_B^{1/\gamma} - E'_Y\right)$$

Коль скоро $E'_Y = lE_R^{1/\gamma} + mE_G^{1/\gamma} + nE_B^{1/\gamma}$ и $l + m + n = 1$, приведенное выражение упрощается до:

$$E_{MG}^{1/\gamma} = E_G^{1/\gamma} + \left(E_Y^{1/\gamma} - E'_Y\right)$$

Таким образом, мы видим, что в RYB-телекамере искажению подвержен только «зеленый» сигнал, тогда как в RGBY-камере искажены все трихроматические сигналы, что на первый взгляд неприемлемо. Однако в случае RGBY-телекамеры искажение представляет собой равновеликую добавку ко всем трем сигналам, что колориметрически эквивалентно небольшой добавке белого света и что, как правило, является весьма и весьма незначительной издержкой. Отметим сразу, что благодаря сему удается почти полностью уйти от смещения по доминирующей длине волны регистрируемых стимулов, и, практика показывает, что эффекты неприводки у RGBY-телекамеры ощутимо менее заметны, чем таковые у камер RYB (Abrahams, 1963).

Следует также помнить о том, что даже RGB-камерами стимулы высокой колориметрической чистоты, но малых пространственных размеров, благодаря эффектам гамма коррекции регистрируются (а телеприемниками воспроизводятся) слишком темными и поэтому четвертый яркостный сенсор работает в том числе и на то, чтобы компенсировать данный недочет.

Плюс к тому, сигналы, полученные от четырехсенсорной камеры, можно подвергнуть обработке и получить сигналы вполне корректные (по крайней мере по основным площадям изображений) и пригодные для дальнейшей передачи. Процедура представляет собой получение дополнительного яркостного сигнала низкого разрешения из исходных трихроматических сигналов, то есть:

$$E_{YC}^{1/\gamma} = \left(lE_R + mE_G + nE_B\right)^{1/\gamma},$$

после чего для получения корректирующего яркостного сигнала низкой четкости из $E_{YC}^{1/\gamma}$-значения отнимается E'_Y-сигнал:

$$E_{YC}^{1/\gamma} - E'_Y$$

Наконец, для получения откорректированного яркостного сигнала (предназначенного уже к передаче) корректирующий яркостный сигнал низкой четкости вычитается из истинного яркостного сигнала высокого разрешения ($E_Y^{1/\gamma}$):

$$E_Y^{1/\gamma} - \left(E_{YC}^{1/\gamma} - E'_Y\right)$$

Когда телеприемник добавляет этот сигнал к своим цветоразностным сигналам, в крупных областях изображения (где $E_Y^{1/\gamma} = E_{YC}^{1/\gamma}$), корректные трихроматические воспроизводящие сигналы рассчитывают по следующей схеме:

$$E_R^{1/\gamma} - E'_Y + E_Y^{1/\gamma} - \left(E_{YC}^{1/\gamma} - E'_Y\right) = E_R^{1/\gamma}$$
$$E_G^{1/\gamma} - E'_Y + E_Y^{1/\gamma} - \left(E_{YC}^{1/\gamma} - E'_Y\right) = E_G^{1/\gamma}$$
$$E_B^{1/\gamma} - E'_Y + E_Y^{1/\gamma} - \left(E_{YC}^{1/\gamma} - E'_Y\right) = E_B^{1/\gamma}$$

Приведенные выше операции вполне осуществимы и поскольку они усложняют конструкцию лишь передатчиков (но не приемников), использование яркостных корректирующих сигналов данного типа при работе с четырехсенсорными камерами — предпочтительно.

Отметим, что подобная коррекция вполне применима и к трехсенсорным RYB-телекамерам. Однако в последнем случае из E_R- и E_B-сигналов и видоизмененного E_Y-сигнала вначале понадобится получить E_G-сигнал низкой четкости (полоса которого уменьшена должным образом). Для получения корректного результата сие должно выполняться с линейными сигналами (напряжение пропорционально фотометрической яркости), что в камерах, построенных на основе плюмбикона или CCD-матрицы, легко осуществимо, поскольку, напомним, гамма этих сенсоров очень близка к единице.

В четырехсенсорных камерах трихроматические сигналы могут иметь бóльшую гамма, нежели сигналы яркостные, благодаря чему можно повысить колориметрическую чистоту воспроизводимых стимулов и тем самым компенсировать системную тенденцию к снижению этой чистоты (вызванную либо игнорированием отрицательных участков теоретических кривых спектральной чувствительности, либо описанной выше добавкой паразитного «белого» сигнала, некомпенсированного яркостным корректирующим сигналом).

Стоит отметить также, что предпринимались попытки создания четырехсенсорных телекамер, в которых за яркостный сигнал отвечает суперортикон, а за трихроматические — три видикона (James, 1963). Однако большинство четырехсенсорных камер задействуют четыре видикона (или четыре плюмбикона), либо же «яркостную» CCD-матрицу в связке с CCD-матрицей, дающей трихроматические сигналы (RGB).

На рис. 20.10 показано устройство четырехсенсорной видиконовой телекамеры (Abrahams, 1963): камера такого типа весьма подходит для кинотелепроекции, т.е. получения цветных телевизионных сигналов с цветных кинопленок (см. гл. 23). Но ежели четырехсенсорная камера используется для обычной телепередачи, то как правило, она четырехплюмбиконовая (Underhill, 1967; Parker-Smith, 1967; James, Perkins, Pyke, Taylor, Kent и Fairbairn, 1970). Для компактности в этих камерах, используется конструкционный блок, показанный на рис. 20.11.

Наконец отметим, что с появлением т.н. *сервоустройств* (см. след. раздел), в ряде сфер отпала необходимость в применении четырехсенсорных камер (Parker-Smith, 1970), но порой они все же используются (правда, уже только с CCD-матрицами).

20.10 АВТОПРИВОДКА (АВТОСВЕДЕНИЕ)

Одним из путей повышения точности пространственной приводки (свéдения) трихроматических изображений телекамерами является применение т.н. *сервоустройств* (*устройств автоприводки* или *автосведения*), позволяющих автоматически и в реальном времени корректировать свéдение электронных трихроматических изображений. Устройства автоприводки могут содержать в себе встроенный тестовый паттерн, выдающий т.н. *сигналы рассогласования*, используемые для управления позициями трех электронных изображений сцены. Либо же, сигналы эти можно получить обычным путем, исходя из того положения, что т.н. *разностный сигнал* (к примеру, разность между сигналом от зеленочувствительного сенсора и сигналом какого-либо иного сенсора) должен быть минимальным, когда электронные изображения точно сведены друг с другом (Wood, 1970).

Некоторые камеры реализуют оба перечисленных принципа: специальный тестовый сигнал используется при пакетных сверхтонких регулировках, включающих наклон и поворот изображений, а т.н. *системы динамической детекции рассогласования* и сервосистемы — при непрерывной регулировке (Underhill, 1971).

20.11 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕЛЕКАМЕР

Как было показано ранее, в качестве теоретически оправданной основы спектрального анализа сцен цветными телекамерами можно рассматривать условие Лютера — Айвса (см. раздел 7.4 и 19.12). Любое отклонение от этого условия ведет к тому, что два одинаковых по воздействию на орган зрения стимула сцены, в телерепродукции этой сцены могут оказаться разными, и, соответственно, наоборот: два визуально разных стимула сцены могут оказаться воспроизведенными одинаково.

Мы помним, что с помощью специально подобранных спектральных коэффициентов пропускания дихроичных светоделителей или фильтров спектральные чувствительности сенсоров телекамеры можно подправить так, что мы получим вполне удовлетворительный набор трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (Jones, 1968). При этом, однако, нет никакой необходимости в использовании трихроматических кривых Стандартного наблюдателя по кардинальным RGB-стимулам телеприемника, поскольку сигналы сенсоров телекамеры можно матрицировать (см. раздел 19.12), т.е. преобразовать из одного набора кривых в другой. Иными словами, спектральные чувствительности сенсоров телекамеры можно оставить полностью положительными, а необходимые отрицательные участки трихроматических кривых Стандартного наблюдателя по кардиналам телеприемника «покрыть» при помощи матрицирования.

При использовании дихроичных светоделителей для оптимизации соотношения «сигнал/шум» желательно уходить от неоправданных светопотерь, давая тем самым возможность применения максимально заостренных трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (см. рис. 19.10).

Особо отметим, что необходимые значения матричных коэффициентов зависят от цветности кардинальных стимулов дисплея, и, следовательно, крайне желательна стандартизация этих цветностей. Такой стандарт был принят по обычным бытовым телевизорам (BREMA, 1969): на рис. 20.12 пунктирными линиями показан согласованный с ним набор трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (сплош-

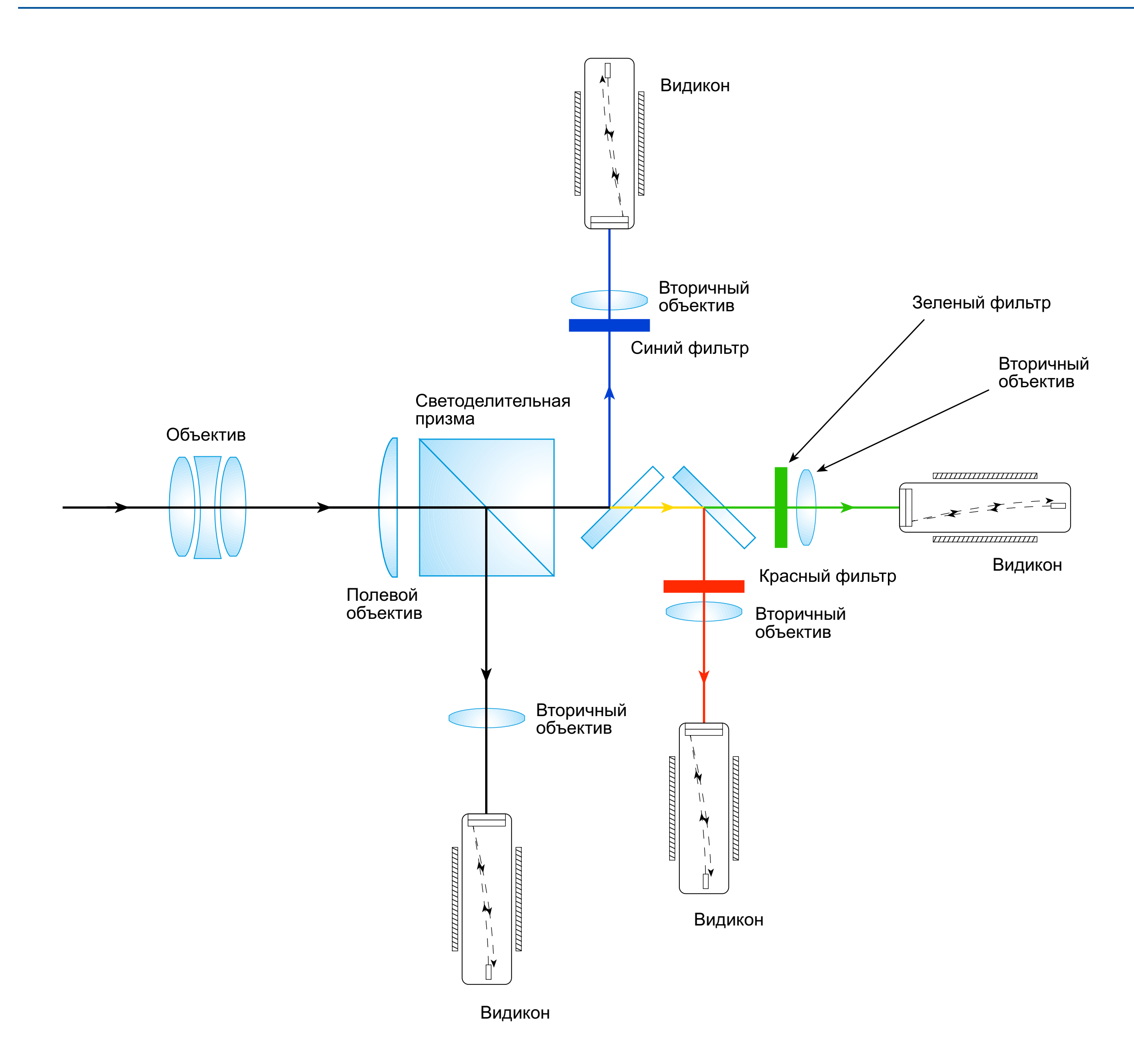


Рис. 20.10 Схема устройства четырехвидиконовой телекамеры.

ными линиями даны трихроматические кривые телекамеры, использующей матрицирование).

Отметим, что практический выбор спектральных чувствительностей обычно основывается на компромиссе, направленном на баланс между несколькими взаимоисключающими требованиями, к примеру: если коэффициенты матрицы оказываются очень высокими, то соотношению «сигнал/шум» можно нанести серьезный урон. Также во избежание возникновения паразитных подцветок весьма желательно выровнять освещенность всех трех сенсоров телекамеры.

Низкая освещенность сенсоров в связке с высокими матричными коэффициентами могут привести к тому, что кривая фотопической световой эффективности [$\bar{y}(\lambda)$], как одна из трихроматических кривых Стандартного наблюдателя, окажется неработоспособной (хотя ее использование в качестве базиса яркостного сигнала, предназначенного к передаче, весьма заманчиво). Компромиссным выходом из положения служит то, что в камере одного типа для передачи более или менее точной яркостной информации о мелких деталях изображения используется спектрально-заостренная

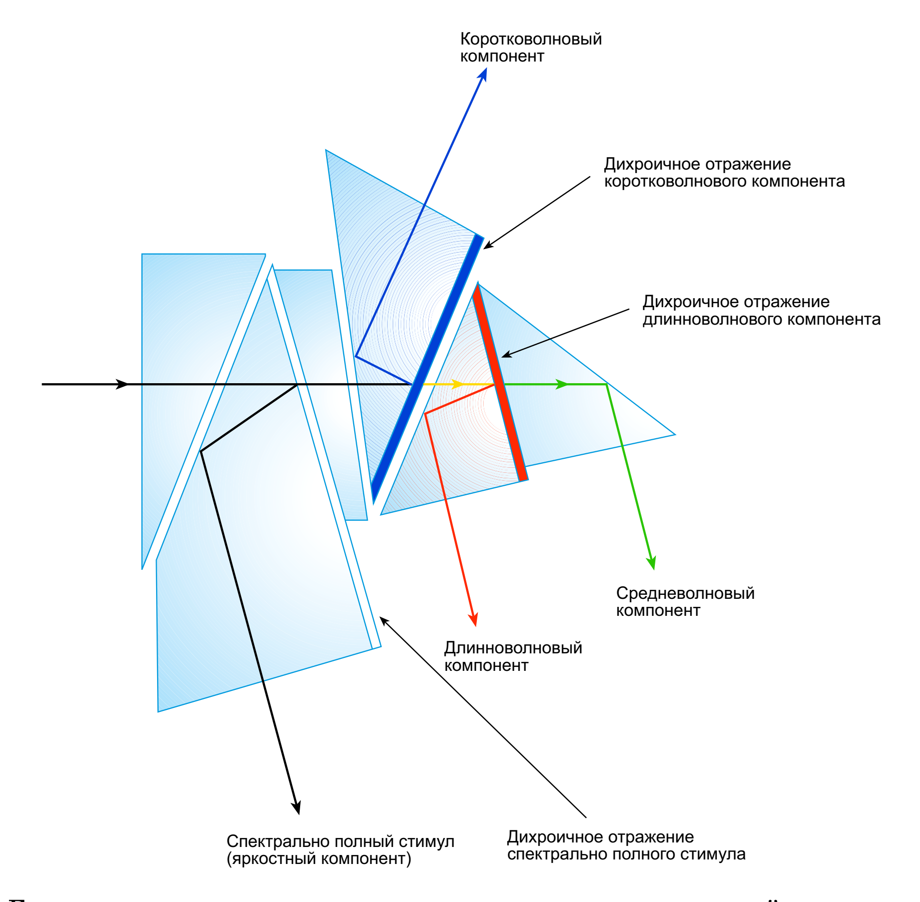


Рис. 20.11 Блок дихроичных светоделительных призм, используемый в некоторых четырехсенсорных телекамерах.

кривая $\bar{y}(\lambda)$, с помощью которой в связке с сигналами от красночувствительного и синечувствительного сенсоров матрицированием получают трихроматические (RGB) сигналы низкой четкости (Underhill и Crowley, 1970).

Прочие компромиссы дают несколько иные результаты, однако во избежание «тяжелого» матрицирования, кривые, используемые на практике, обычно спектрально-острее, чем заостренные трихроматические кривые Стандартного наблюдателя, показанные на рис. 19.10.

Несмотря на то, что использование набора трихроматических кривых Стандартного наблюдателя в совокупности с матрицированием по кардинальным стимулам телеприемника делает возможным колориметрически точное репродуцирование в рамках цветового охвата этих стимулов, работа системы с общим коэффициентом контрастности (гамма), превышающим 1.0, приводит к погрешностям, показанным на рис. 19.11. Проще говоря, преимущество в использовании трихроматических кривых Стандартного наблюдателя здесь не столь очевидно как в системе с единичной гамма, а оптимальные матричные коэффициенты обычно приходится подбирать эмпирически (Sproson, 1978 и 1983).

Наконец отметим, что равенство спектральных чувствительностей всех телекамер, используемых в данной студии, очень важно, но, поскольку идеальное выравнивание труднодостижимо, финальную хроматическую балансировку предпочтительнее проводить все-таки по коже человека, нежели по белому или серому тестам (Knight, 1972).

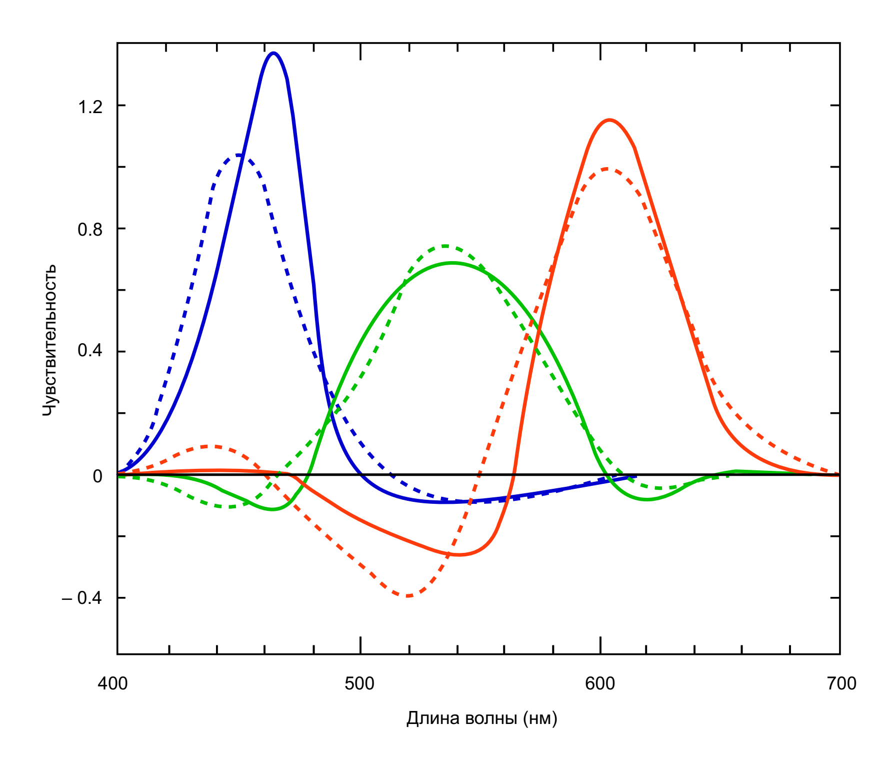


Рис. 20.12 Пунктирные линии: трихроматические кривые Стандартного наблюдателя по кардинальным стимулам, воспроизводимым люминофорами типичных телеприемников (BREMA, 1969). Сплошные линии: типичные кривые спектральной чувствительности телекамер, полученные матрицированием.

20.12 АПЕРТУРНАЯ КОРРЕКЦИЯ

20.12.1 Горизонтальная апертурная коррекция

Даже когда оптическое изображение на поверхности передающей трубки (и, соответственно, электрическое изображение) идеально резкие, результирующий сигнал, выданный этой трубкой будет соответствовать изображению пониженной резкости, поскольку сканирующий пучок имеет некий конечный диаметр сечения — *апертуру*. Сие ведет к базовому ограничению количества точек на ширину изображения и снижению контраста на вертикальных краях его элементов.

Однако контраст на вертикальных краях, можно вновь повысить, прибегнув к методу т.н. *горизонтальной апертурной коррекции*. Одним из путей реализации такой коррекции является временна́я задержка сигнала (сравнимая со временем, что уходит на сканирование участка, сопоставимого по размеру с эффективной апертурой электронного луча) и последующим вычитанием из нее корректирующего сигнала, представляющего собой функцию от среднего незадержанного сигнала и сигнала, задержанного вдвое. Таким путем можно достичь эффекта, весьма сходного с нерезкой маской (см. раздел 15.3), поскольку корректирующий сигнал менее четкий, нежели главный, и, следовательно, менее контрастный. Следствием вычитания его из основного сигнала является снижение контрастности во всех элементах изображения за исключением мелких деталей этого изображения. Следовательно, повышением общей контрастности полного сигнала можно восстановить контрастность изображения в крупных его деталях.

20.12.2 Вертикальная апертурная коррекция

Описанным выше путем можно применять т.н. *вертикальную апертурную коррекцию*, позволяющую компенсировать тенденцию электронного пучка камеры (построенной на передающих трубках, разумеется) быть в сечении своем больше, чем расстояние между соседними строками. При вертикальной апертурной коррекции основной сигнал задерживается на время, которое уходит на сканирование одной *строки*, а корректирующий сигнал, представляет собой функцию от среднего незадержанного сигнала и сигнала, задержанного вдвое. В данном случае «нерезкая маска» будет эквивалентна 3 строкам полукадра (6 строкам изображения).

20.12.3 «Техника повышения четкости без зеленого»

В трех- и четырехтрубочных камерах применение апертурной коррекции дает выраженный эффект только в том случае, если камера обеспечивает очень хорошую приводку электронных изображений (напомним, что зрительная система человека очень чувствительна к хроматическим контурам). Однако вполне возможно получить общий «маскирующий» сигнал только от *одного* сенсора телекамеры (к примеру, яркостного сенсора четырехсенсорной камеры) и использовать его в качестве корректирующего сигнала для *всех* главных сигналов.

Таким образом, преимущество четырехсенсорных камер перед трехсенсорными состоит в том, что на усиление краевого контраста, реализованное за счет единичного сенсора, неприводка первичных изображений не оказывает никакого влияния. Данный способ получил название «*техники повышения четкости без зеленого*» (*«contours out of green»*), поскольку именно зеленочувствительный сенсор телекамеры (спектральная чувствительность которого такова, что сигнал этого сенсора ближе всего к истинному яркостному сигналу) — это в целом наиболее подходящий источник сигнала корректирующего (De Vrijer, Tan и Van Doorn, 1966).

20.13 ВИДЕОЖУРНАЛИСТИКА

Переход с трубок на CCD-матрицы позволил конструировать телекамеры весьма и весьма компактными и легкими, то есть пригодными для съемки «с рук», что в свою очередь привело к появлению и развитию такого телевизионного жанра как *видеожурналистика*.

Отметим также, что легкие носимые камеры позволяют вести репортажи с места событий и с минимальной задержкой передавать отснятый материал на телестудию. Легкие портативные телекамеры дают возможность осуществлять как обычную телесъемку, так и использовать телекамеру в качестве цифровой фотокамеры.

20.14 КАМКОРДЕРЫ

Когда телекамеру конструкционно объединяют с каким-то записывающим устройством, она превращается в т.н. *камкордер*. Действительно, в сфере любительского видео комбинация CCD-камеры с компактным видеорекордером стала очень популярной (см. раздел 24.3 и гл. 31).

20.15 ЦИФРОВЫЕ ФОТОКАМЕРЫ

Первая цифровая фотокамера, построенная на базе системы *Mavica* и предназначенная для любительской съемки, была разработана компанией Sony (Crawley, 1981). Матрица камеры представляла собой паттерн из 279300 светочувствительных элементов (570×490). Информация о первичном оптическом изображении сцены заносилась на перезаписываемый магнитный диск, а полученное цифровое изображение воспроизводилось на обыкновенном бытовом телевизоре, либо использовалось для печати на термопринтере *Mavigraph*.

Светочувствительность системы составляла 200 ASA (см. раздел 14.27).

Разрешение изображения ограничивалось геометрией сенсора и было ниже, чем у камер широковещательного телевидения.

На сегодняшний день в ходу цифровые фотокамеры с CCD-матрицами в миллионы пикселов (см. раздел 20.5 и гл. 31), а отпечатки можно получить из электронных сигналов этих камер посредством самых разных технологий (см. гл. 33).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Abrahams, I.C., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 72, 594 (1963).
Benson, K.B., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 90, 708 (1981).
B.R.E.M.A., Radio and Electronic Engineer, 38, 201 (1969).
Crawley, G., Brit. J. Phot., 128, 1112 (1981).
Davenport, F.A., Brit. Kinematog. Sound Tel., 67, 480 (1985).
De Haan, E.F., and Van Doorn, A.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 73, 473 (1964).
De Haan, E.F., and Van Doorn, A.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 74, 922 (1965).
De Vrijer, F.W., Tan, A.L., and Van Doorn, A.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 75, 1080 (1966).
Dillon, P.L.P., Lewis, D.M., and Kaspar, F.G., I.E.E.E. Trans. Electron Devices, 25, 97 and 102 (1978).
James, I.J.P., Private communication (1963).
James, I.J.P., Perkins, D.G., Pyke, P.J., Taylor, E.W., Kent, D.E., and Fairbairn, I.A., Radio and Electronic
Engineer, 39, 249 (1970).
James, I.J.P., and Karowski, W.A., J. Brit. Inst. Radio Engrs., 23, 297 (1962).
Jones, A.H., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 77, 108 (1968).
Knight, R.E., Brit. Kinematog. Sound Tel., 54, 272 (1972).
Monteath, G.D., J. Roy. Television Soc., 11, 109 (1966).
Neuhauser, R.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 65, 636 (1956).
Oshima, S., Image Technology, 70, 11 (1988).
Parker-Smith, N.N., Brit. Kinematog. Sound Tel., 49, 100 (1967).
Parker-Smith, N.N., I.E.E. Conference Publications, No. 69, p. 147 (1970).
Sproson, W.N., Proc. I.E.E., 125, 603 (1978).
Sproson, W.N., Colour Science in Television and Display Systems, p. 27, Adam Hilger, Bristol (1983).
Underhill, W.T., J. Roy. Television Soc., 11, 167 (1967).
Underhill, W.T., J. Roy. Television Soc., 13, 191 (1971).
Underhill, W.T., and Crowley, V.D., I.E.E. Conference Publications, No. 69, p. 138 (1970).
Van Doorn, A.G., De Lang, H., and Bouwis, G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 75, 1002 (1966).
Wood, C.B.B., I.E.E. Conference Publications, No. 69, p. 50 (1970).

21 ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЛЕИЗОБРАЖЕНИЙ

21.1 ВВЕДЕНИЕ

Мы помним, что первые телевизионные системы, строившие захват сцены на базе механических или оптических устройств (см. рис. 20.1), дробивших изображение на серии строк, при визуализации изображения на экране телеприемника использовали аналогичные механические устройства. С изобретением иконоскопа и появлением телевидения приемлемой четкости потребовался способ скоростной «отрисовки» (развертки) изображений. Способ этот был найден: стала применяться т.н. *электронно-лучевая трубка* (*кинескоп*), принцип которой состоит в том, что световое излучение возникает за счет возбуждения слоя люминесцирующего вещества электронным пучком, быстро скользящим по поверхности этого слоя.

21.1.1 Устройство и принцип действия кинескопа

На рис. 21.1 (а) показаны основные узлы типичной телевизионной электронно-лучевой трубки (кинескопа).

Т.н. *катод* устройства покрыт соответствующим электрон-испускающим веществом и, по мере нагрева этого вещества, в последнем образуется определенный запас электронов. Катод помещен в вакуумную колбу, благодаря которой электроны разгоняются в направлении *анода*, заряд которого по отношению к катоду резко положительный.

Разогнанные электроны бомбардируют *экран*, покрытый изнутри слоем люминофора, в результате чего последний испускает свет. Количество испущенного света регулируется изменением разности потенциалов между катодом и т.н. *модуляторной сеткой* (часто называемой «*управляющей сеткой*» или просто «*сеткой*»), а экранная позиция свечения регулируется с помощью *фокусирующих* и *отклоняющих устройств*.

Фокусирующие устройства, создающие в горловине колбы электростатические (либо электромагнитные) поля, собирают электронный пучок на люминофоре в маленькую точку, а т.н. *дефлекторы* (отклоняющие устройства), представляющие собой обычно проволочные катушки, создают магнитные поля, заставляющие электронный пучок быстро перемещаться по поверхности трубки, проходя ее строка за строкой в определенном режиме, и воспроизводя тем самым требуемое изображение (или, как говорят, выполняя *развертку* этого изображения).

Точности развертки содействует покрытие внутренней конической части трубки проводящим слоем, имеющим тот же потенциал, что и у анода: сие создает электронному пучку пространство, условно свободное от каких-либо электростатических полей.

Люминофор со своей внутренней стороны обычно покрыт тончайшим слоем алюминия, удерживающим анодный потенциал и не только избавляющим от электростатических полей, но и предотвращающим вторичную эмиссию электронов из люминофора.

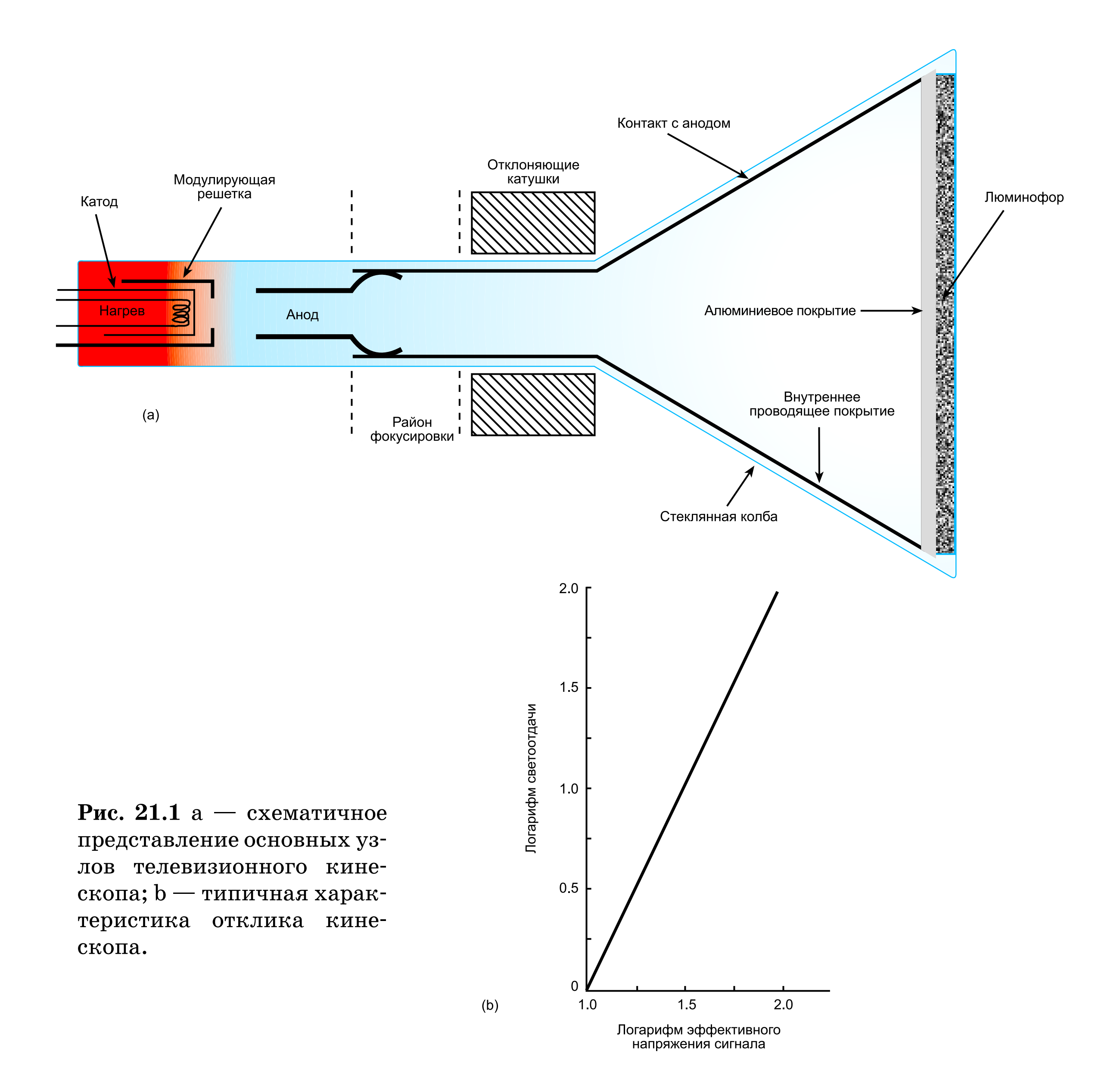


Рис. 21.1 а — схематичное представление основных узлов телевизионного кинескопа; b — типичная характеристика отклика кинескопа.

Плюс к тому, слой алюминия отражает свет, испущенный люминофором в заднем направлении (т.е., в сторону катода), и перенаправляет его в общий световой поток.

Типичные величины напряжения в электронно-лучевых трубках таковы:

— диапазон напряжений на аноде — до 16 кВ (киловольт) у черно-белых кинескопов;

— до 25 кВ — у цветных;

— до 100 кВ — у проекционных.

Разность потенциалов между управляющей сеткой и катодом может составлять несколько порядков. Когда разность эта отрицательна (напряжение на управляющей сетке *ниже*, чем напряжение на катоде), то есть, когда в идеале ни один электрон не попадает на слой люминофора, то воспроизводится «черный» стимул; когда разность напряжений между сеткой и катодом положительна и максимальна, то воспро-

изводятся стимулы максимально высокой фотометрической яркости («*белая точка*», «*точка белого*»).

Разность потенциалов, воспроизводящая черный, именуется «точкой черного» (или «точкой гашения»), и регулируется потенциометром, который в домашних телеприемниках обычно обозначен как «*Яркость*».

Отметим, что разность потенциалов между управляющей сеткой и катодом удобно выражать в виде разности от точки черного, что получило название «*эффективного напряжения сигнала*» (регулируемого потенциометром, который в домашних телеприемниках обычно обозначен как «*Контраст*»).

Отметим также, что сила тока электронов (т.н. *ток пучка*) обычно меняется от нуля (черная точка) до нескольких сотен микроампер (белая точка).

Фотометрическая яркость белой точки при обычном просмотре составляет примерно 100 кд/м^2, но у проекционных трубок (напряжение на катоде которых составляет примерно 100 кВ) она может быть в несколько раз больше. Высокие фотометрические яркости могут оказаться нежелательными при прямом просмотре (то есть, непроекционном — *Прим. пер.*), поскольку при частоте смены полукадров 50-60 Гц мелькание незаметно только на малых уровнях фотометрической яркости.

Стоит сказать, что кинескопы, используемые на практике, устроены много сложнее того, что показан на рис. 21.1 (а), и в их состав входят дополнительные сетки и электроды, к примеру: т.н. *анодная* (*экранирующая*) *сетка* (напряжение на которой на несколько сот вольт выше, чем на катоде), а также фокусирующие электроды (напряжение на которых на несколько тысяч вольт выше, чем на катоде). Последние позволяют разогнать электроны за счет нескольких последовательных скачков напряжения между катодом и анодом.

21.1.2 Светоотдача люминофоров

Когда эффективное напряжение (E) равно нулю, ток пучка по определению равен нулю. По мере роста E ток пучка (I) растет, что ведет к возникновению эффекта, сходного с увеличением просвета диафрагмы в объективе. Если эффективный диаметр электронной диафрагмы примерно пропорционален E, то площадь диафрагмы будет пропорциональна E^2 и, следовательно, ток пучка (I) будет примерно пропорционален E^2. Мощность пучка, соответственно, равна силе тока, умноженной на ускоряющее напряжение (V), то есть: VI.

Ускоряющее напряжение (V) равно отношению напряжения на аноде к напряжению на катоде, и, хотя последнее может меняться по мере изменения E, максимальный разброс обычно не превышает 100 В (что несравнимо с анодным напряжением в десятки тысяч вольт). Следовательно, ускоряющее напряжение (V) можно полагать константным, а мощность пучка — пропорциональной току пучка (I).

Если люминофор *линеен*, то есть таков, что его светоотдача пропорциональна мощности пучка (и, следовательно, пропорциональна его току — I), то, поскольку I пропорционален E^2, величина светоотдачи такого гипотетического кинескопа будет также пропорциональна E^2.

21.1.3 Тон-репродукционные характеристики люминофоров

Тон-репродукционные характеристики реальных электронно-лучевых трубок таковы, что светоотдача люминофоров примерно пропорциональна функции, лежащей между квадратом и кубом эффективного напряжения сигнала. Следовательно, если

логарифм светоотдачи взять как функцию от логарифма эффективного напряжения сигнала, то получится прямая линия (рис. 21.1 [b]). Тангенс угла наклона этой прямой (*гамма*) будет равен 2.8±0.3, что в 1969 г. было принято в качестве единого стандарта цветного телевидения (BREMA, 1969).

21.1.4 Динамический диапазон кинескопа

Динамический диапазон электронно-лучевой трубки при отсутствии паразитной (внешней) подсветки зависит от величины т.н. «светоизбытка» в самоей трубке. Последний может привести к тому, что кинескоп окажется не в состоянии обеспечить диапазон яркостей воспроизводимых стимулов даже 100:1 (2.0D). Однако на практике внешнее просмотровое освещение осветляет черную точку до уровня, при котором она выходит на фотометрическую яркость по меньшей мере 2% от фотометрической яркости белой точки, в результате чего динамический диапазон снижается до 50:1 (1.7D). Когда речь идет об условиях тусклого окружения последнее будет эквивалентно 1.7/1.25, то есть — 1.4D, что много меньше, чем 2.2D типичных уличных сцен (Jones и Condit, 1941; Hunt, 1965).

Если величины паразитной внешней подсветки и внутреннего светоизбытка в сумме составляют примерно 5% , то динамический диапазон трубки падает до 20:1 (1.3D), что свойственно отражающим отпечаткам (см. раздел 13.10). В реальной практике эта сумма держится в диапазоне 2-5% от общего диапазона (Wentworth, 1955) (см. также разделы 19.13 и 21.15).

* * *

Итак, реализация принципа электронно-лучевой трубки (напомним — свечение, вызываемое электронной бомбардировкой люминесцирующей поверхности) в сфере цветного телевидения потребовала очень серьезных технологических усилий, и, чтобы запустить в серию недорогие бытовые телеприемники, понадобилась колоссальная изобретательность конструкторов. Некоторые из бытовых аппаратов, а также ряд устройств, предназначенных для специфического применения, будут описаны ниже (Sproson, 1983; MacDonald и Lowe, 1997).

21.2 ТРИНОСКОП

В т.н. *триноскопе* кардинальные трихроматические изображения воспроизводятся тремя отдельными электронно-лучевыми трубками, после чего мнимые изображения от двух из них объединяются с третьим при помощи полупрозрачных дихроичных зеркал. С целью повышения световой эффективности устройства применяются красносветящийся, зеленосветящийся и синесветящийся люминофоры (дополнительно можно использовать специальные корректирующие фильтры).

Главными проблемами триноскопа являются обеспечение высокоточной приводки воспроизводящих трихроматических изображений и согласование их тон-репродукционных характеристик; очевидно также и то,что в данном контексте характер проблем будет тем же, что и в светоделительных цветных телекамерах. Следовательно, на практике приходится использовать электронно-лучевые трубки только очень высокого качества, а также разнообразное вспомогательное оборудование и сверхточные зеркала, расположенные в строго фиксированном пространственном положении. В результате себестоимость триноскопа оказывается очень высокой, но, несмотря на

это досадное обстоятельство, явным достоинством системы остается то, что фотометрическая яркость воспроизводимых ею изображений оказывается много выше, чем у обычных кинескопов.

Типичная область применения триноскопа — телекинопроекция, то есть кинозапись телепередач (Venis, 1969). Отметим также, что триноскопы слишком дороги и громоздки для того, чтобы использоваться в конструкции домашних телеприемников.

21.3 СИСТЕМЫ ТРОЙНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В проекционных телевизионных устройствах можно применять ранее упоминавшийся принцип тройного проектирования (см. раздел 3.1), то есть задействовать три проекционных кинескопа, позиционированных так, что трихроматические изображения объединятся на одном общем отражающем экране (Federman и Pomicter, 1977).

При этом неизбежно придется преодолевать трудности пространственного сведе́ния этих изображений и мириться с невысокой фотометрической яркостью результирующего цветного изображения, но при этом все же можно добиться вполне удовлетворительных визуальных результатов.

Ранее метод тройного проектирования активно применялся при демонстрации цветных телепередач в больших аудиториях, имитации ландшафтов и водных поверхностей при тренировках начинающих летчиков и моряков (Marconi, 1969), а также (в дальнейшем) при показе развлекательных передач во время гражданских авиаперелетов.

Наконец отметим, что высокой фотометрической яркости изображений в системах тройного проектирования можно достичь за счет полупрозрачных экранов задней подсветки, и очевидно то, что данный метод весьма подходит разного рода имитаторам, презентациям и даже домашнему телепросмотру.

21.4 ТРУБКИ С ТЕНЕВОЙ МАСКОЙ

Уйти от сложностей в обеспечении должной точности приводки воспроизводящих изображений в триноскопе и при тройном проектировании, а также уменьшить габариты устройств можно за счет применения т.н. *кинескопа с теневой маской*, в котором три электронных пушки помещены в общую электронно-лучевую трубку. Разумеется, необходимость в электронной приводке трихроматических изображений по прежнему останется, однако за счет того, что все три пушки находятся в общей трубке, в развертке строк изображения могут участвовать одни и те же магнитные поля.

Описанная конструкция существенно облегчает положение, однако при этом возникает множество мелких сложностей, вызванных тем фактом, что коль скоро три электронных пучка берут начало из разных пространственных положений, они немного по-разному воспроизводят трихроматические изображения, к примеру: когда пучки выполняют развертку изображения в углах кинескопа, им приходится проходить больший путь, нежели когда они разворачивают центр. Следовательно, точного сведения пучков лишь по центру экрана недостаточно и оно должно оставаться таким же и по углам. Последнее означает, что характер управляющих магнитных полей в процессе развертки должен меняться за счет управления формой кривой тока в электромагнитах (Law, 1977).

Итак, перед тем как попасть на люминофоры электронные пучки сталкиваются с металлической пластиной, отстоящей примерно на 18 мм от слоя люминофоров и содержащей примерно 400000 мельчайших отверстий. Люминофоры, как мы знаем, залегают в

виде точек (см. рис. 3.1 и 21.2), и при этом направление электронных пучков, позиции отверстий и позиции люминофоров должны быть такими, чтобы красносветящийся люминофор подвергался воздействию пучка только той пушки, что управляется «красным» трихроматическим сигналом, зеленосветящийся — воздействию пучка только той пушки, что управляется «зеленым» сигналом, синесветящийся — «синим».

Отметим, что ряды точек не должны лежать на строках изображения, поскольку в этом случае они создают т.н. *муаровый паттерн* (*систему муаровых полос*), образуемый промежутками между строками, и т.н. *точечный паттерн* со строго заданными углами между точками: муаровая картина легко заметна, когда углы меняются в диапазоне $\pm 30^\circ$ и практически незаметна при 0° (поэтому строки изображения должны быть более или менее параллельны рядам точек).

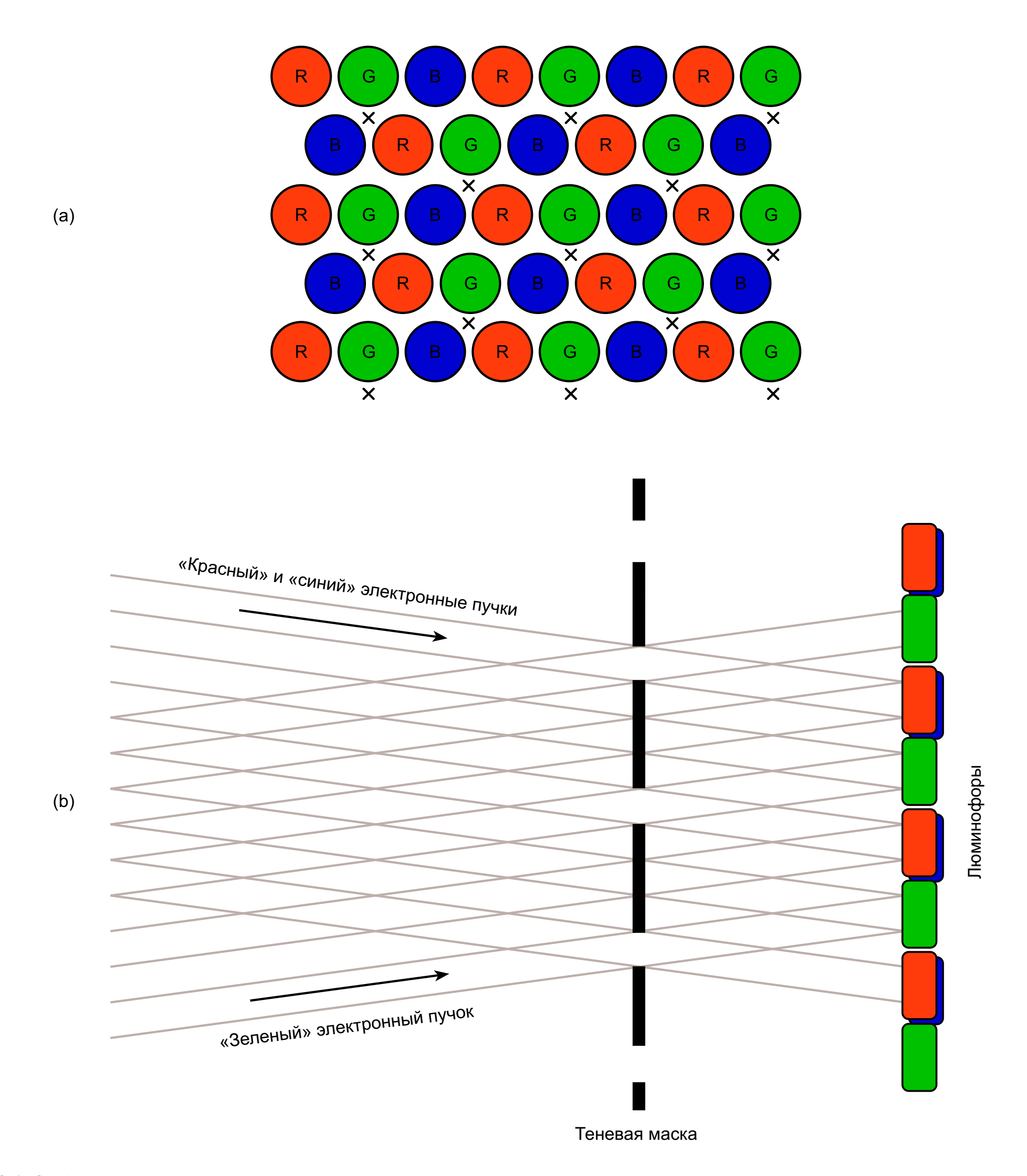


Рис. 21.2 Кинескоп с теневой маской: (a) — люминофорные точки и отверстия в теневой маске (обозначены как «×»); (b) — направления хода электронных пучков (вид сверху).

21.4.1 525-строчные системы

В теневой маске 525-строчных систем (отдающих, как правило, 483 строки на собственно изображение) обычно протравливается 357000 отверстий, то есть примерно 690 отверстий на каждую строку. Таким образом, максимальное разрешение изображения составляет 345 пар точек на строку и 260 пар точек по вертикали (345×260).

Если диаметр сечения электронных пучков таков, что облучают они только один ряд отверстий (согласно триадам люминофорных точек), то трубка 525-строчной системы не снизит разрешения результирующего изображения ниже 483 строк. Сказанное, однако, не является критичным условием работы кинескопа, и на практике, как правило, каждый электронный пучок облучает несколько рядов отверстий (и, соответственно, согласованных с ними люминофоров). Таким образом, даже теоретически имеет место неизбежное снижение четкости результирующих изображений. Однако ряд иных факторов, в частности, таких как чересстрочная развертка, также не лучшим образом сказываются на их четкости (Jesty, 1958).

21.4.2 625-строчные системы

В теневой маске 625-строчных систем (имеющих, как правило, 575 строк эффективного разрешения) обычно протравливается порядка 440000 отверстий, дающих примерно 575 рядов по 770 отверстий в каждом: и вновь четкость результирующих изображений ограничивается, в первую очередь, диаметром сечения электронных пучков, нежели структурой точек.

21.4.3 Технология производства теневых масок

Кинескопы с теневой маской способны воспроизводить изображения высочайшего качества и активно применяются в производстве как высококачественных мониторов, так и домашних телеприемников.

В производстве таких трубок следует очень внимательно следить за тем, чтобы паттерн люминофорных точек был строго согласован с паттерном отверстий теневой маски — в противном случае возникает паразитная подцветка нейтральных стимулов и загрязнение колориметрически чистых (что ведет к серьезным отклонениям по цветовому тону и тех, и других). Следовательно, отверстия в теневой маске выполняются по особой технологии, а именно *протравливаются* путем т.н. *фотогравировки*, которая задействует специальный *мастер-негатив*, гарантирующий почти абсолютную геометрическую точность этой гравировки. Внутренняя поверхность трубки покрывается затем т.н. *фоторезистом*[1], содержащим красносветящийся люминофор, после чего сверху монтируется металлическая пластина с отверстиями, а в позицию соответствующей электронной пушки устанавливается источник света. Свет проходит через отвер-

---

[1] *Фоторезист* (от фото... и англ. resist – сопротивляться, препятствовать) — полимерный светочувствительный слой, нанесённый на какую-либо поверхность. Ф. используются в полупроводниковой электронике и микроэлектронике для получения на пластинах «окон» заданной конфигурации. В результате экспонирования Ф. ультрафиолетовым излучением (иногда электронным лучом) через наложенный на него стеклянный шаблон с нужным рисунком свойства полимера меняются: либо резко уменьшается растворимость Ф. (негативный Ф.), либо он разрушается и становится легко удалимым (позитивный Ф.).— *Прим. пер.*

стия в металлической пластине, и воздействует на фоторезист, который, отвердевая, образует люминофорные точки.

На следующем технологическом этапе металлическая пластина удаляется, забирая с собой неотвердевший фоторезист, и оставляя при этом на поверхности трубки паттерны люминофорных точек.

Аналогичные пластины устанавливаются затем строго в ту же позицию, что и первая, в результате чего тем же путем образуются точки зеленосветящегося и синесветящегося люминофоров.

Наконец отметим, что в трубке с диагональю 56 см расстояние между соседними точками составляет всего лишь 0.4 мм, что, как мы видим, требует крайней точности выполнения всех описанных выше операций (Wright, 1971).

21.4.4 Видеомониторы

При визуализации цифровых (компьютерных) данных чаще всего используются т.н. *видеомониторы*, построенные на базе трубок с теневой маской. В данном случае дистанция просмотра составляет, как правило, от полуметра до метра, противу двух-трех метров при типичном домашнем телепросмотре. Следовательно, необходимо использовать трубки с гораздо более плотными точечными структурами.

Точечная структура, которую обычно называют *пиксельной триадой*, такова, что ежели «p» — это расстояние между соседними отверстиями в маске, $(1/2)p$ — расстояние между соседними рядами люминофорных точек — (см. рис. 21.2[а]), а $p/\sqrt{3}$ — расстояние между соседними люминофорными точками, то в том случае, когда соседние люминофорные точки отстоят друг от друга на 0.4 мм (типичный домашний телеприемник), размер пиксельной триады будет равен $0.4\times\sqrt{3}$(что примерно равно 0.7 мм).

В видеомониторах размер пиксельной триады обычно равен либо 0.3 мм, либо 0.2 мм. Наконец отметим, что каждая вертикальная пиксельная триада образуется двумя строками отверстий теневой маски (см. 21.2).

Понятно, что три электронных пучка цветного видеомонитора должны быть очень точно сведены между собой по всей площади дисплея, поскольку их несведéние очень хорошо заметно при визуализации мелких символов (особенно в тех случаях, когда символы эти располагаются на черном фоне). По этой причине в видеодисплеях применяется специальная система управления сведением, обеспечивающая точность в половину или треть толщины телестроки (что желательно). Такие дисплеи также часто являются *построчными*, то есть, в них *не* используется чересстрочная развертка.

21.4.5 Диаметр пятна

Номинальный диаметр пятна в трубке с теневой маской принято определять при фотометрической яркости равной половине яркости белой точки. У видеомониторов диаметр пятна обычно равен двойному диаметру пиксельной триады и не должен быть меньше, поскольку меньший диаметр при воспроизведении мелких символов неизбежно приводит к возникновению хроматических аберраций, а также затрудняет определение зрительной системой наблюдателя центра пятна или строки. К примеру, при диаметре пиксельной триады 0.3 мм номинальный диаметр пятна должен быть равен 0.6 мм.

Отметим, что видеомониторы не требуют того, чтобы их строчный стандарт соответствовал телевизионному: при высоте дисплея в 280 мм (типичная высота трубок с диагональю 19 дюймов [48 см]) диаметр пятна 0.6 мм соответствует $280/0.6 = 467$ стро-

кам. Однако порой применяют и большее число строк, вплоть до 1000: избыточное число строк иногда оказывается удобным в контексте снижения вероятности возникновения т.н. *алиайзинга* — появления паразитной зубчатости краев искривленных и наклоненных прямых линий.

В бытовом телевидении диаметр пятен можно приравнять к диаметру пиксельной триады, поскольку необходимость в отображении мелких символов возникает крайне редко, то есть, при высоте дисплея в 325 мм (свойственно трубкам с диагональю 22 дюйма [56 см]) пиксельная триада и номинальный диаметр пятна в 0.7 мм соответствуют 325/0.7 = 464 строкам. То есть, увеличение диаметра пятна не столь критично. Применение большего числа строк (483 или 575), опять же, позволяет уменьшить степень алиайзинга.

21.5 ТРИНИТРОН

Электронно-лучевая трубка, в которой люминофоры расположены в виде вертикальных стрипов, относятся к категории *тринитрон*. В этой трубке электронные пучки лежат в одной плоскости, а в металлической пластине вместо отверстий проделаны вертикальные щели, позиционированные так, что электроны одного пучка воздействуют на стрипы только красносветящегося люминофора, другого — на стрипы зеленосветящегося, третьего — синесветящегося (см. раздел 3.4).

Перед трубками с теневой маской у тринитрона имеется ряд очевидных преимуществ:

— во-первых, управление отклонением лучей ощутимо проще, поскольку конструкция пушки позволяет сделать шейку трубки очень узкой;

— во-вторых, изображение на единицу площади излучает вдвое больше света: дело в том, что при том же диаметре пятна ток пучка можно усилить в 1.5 раза, а также в том, что стрипы люминофоров покрывают площадь в 1.33 раза бóльшую, чем у трубок с теневой маской;

— в-третьих, вертикальное разрешение трубки не зависит от экранной структуры, то есть не возникает муаров и снижения разрешения по вертикали;

— в-четвертых, поскольку электронные пучки лежат в одной плоскости, гораздо проще обеспечить высокую точность сведéния лучей и, следовательно, высокую точность приводки кардинальных трихроматических изображений.

Ширина триады люминофорных стрипов может достигать 0.5 мм, давая при этом примерно 600 триад на трубку 300 мм ширины. Уравнивание вертикального и горизонтального разрешений требует того, чтобы яркостный сигнал был способен дать 350 циклов на строку (к примеру, $525\times1/2\times(4/3) = 350$ черно-белых пар в системе с 525 фактическими строками на изображение), следовательно, требуемое количество вертикальных триад в идеале не должно быть меньше 700. Однако, как и в трубках с теневой маской, и меньшее их количество можно использовать без видимого падения разрешения, поскольку в фактический результат визуального восприятия изображения вмешивается чересстрочная развертка (а также ряд других факторов) (Jesty, 1958).

Наконец отметим, что диагональ дисплеев, построенных на базе тринитрона, как правило, несколько меньше, чем таковая у дисплеев, выполненных на основе трубки с теневой маской.

21.6 САМОСВОДЯЩИЕ ТРУБКИ

Тринитрон и обычные трубки с теневой маской требуют в своем устройстве наличия систем т.н. *динамической коррекции сведе́ния лучей*. Необходимость продиктована тем (см. раздел 21.4), что для обеспечения точной приводки электронных пучков в углах изображения нужны менее мощные магнитные поля, чем по центру (поскольку углы расположены дальше от электронных пушек и, следовательно, электронный пучок длиннее). Поскольку электронные пучки все время движутся по поверхности трубки, необходимо *динамическое* изменение напряженности этих полей, согласованное с пространственной позицией пучков в данный момент времени.

В т.н. *компланарных кинескопах* (то есть, кинескопах с компланарным расположением пушек и с самосведением) электронные пушки позиционированы одна параллельно другой и в одной горизонтальной плоскости (как в тринитроне), но вместо системы динамической коррекции све́дения в шейке трубки имеется определенным образом позиционированная отклоняющая катушка, прецизионно сводящая электронные пучки на теневой маске во всех пространственных позициях изображения.

Такая катушка способна работать только в одной из плоскостей — вертикальной или горизонтальной. В нашем случае по горизонтали лучи уже сведены, а по вертикали они сводятся до того, как попадут на маску (после чего распадаются на короткие вертикальные полоски). Однако, замена теневой маски с отверстиями на щелевую маску позволяет обеспечить просев электронов на уровне примерно 16%, что аналогично таковому у обычных кинескопов с теневой маской (хотя и несколько меньше, чем у тринитронов, просев которых составляет примерно 20%).

После прохода через щели электроны попадают на красносветящийся, зеленосветящийся и синесветящийся люминофоры, расположенные в виде стрипов (то есть, также как и в тринитроне). Отметим, что когда щели выполнены в виде отрезков, маска становится существенно менее требовательной к сферичности ее профиля (как то необходимо трубкам с теневой маской), либо к его цилиндричности (как в тринитроне).

Ширина люминофорных стрипов в компланарных кинескопах составляет 0.0108 дюйма (0.27 мм), то есть каждый кардинальный стимул повторяется через каждые 0.0324 дюйма (0.81 мм).

Иными словами, геометрия люминофорных стрипов, щелей в маске и электронных пушек у компланарных кинескопов такова, что электроны от каждой пушки воздействуют только на «свой» люминофор. Пушки при этом монтируются на расстоянии 0.200 дюйма (5.08 мм) одна от другой.

Компланарные кинескопы применяются в основном в дисплеях малого и среднего размеров (см. рис. 21.3). Отметим, что в этих кинескопах могут использоваться как короткие вертикальные полоски, так и классические люминофорные точки.

21.7 СВЕТОКЛАПАННЫЕ ПРОЕКТОРЫ

Т.н. *светоклапанные проекторы* задействуют источник света весьма высокой интенсивности (в частности, такой как ксеноновая дуговая лампа) и модулируют световой поток по каждому элементу изображения, в той или иной мере отклоняя свет от специальной апертуры. Примером устройств такого типа является аппарат *Эйдофор* (*Eidophor*) (Kays, 1987).

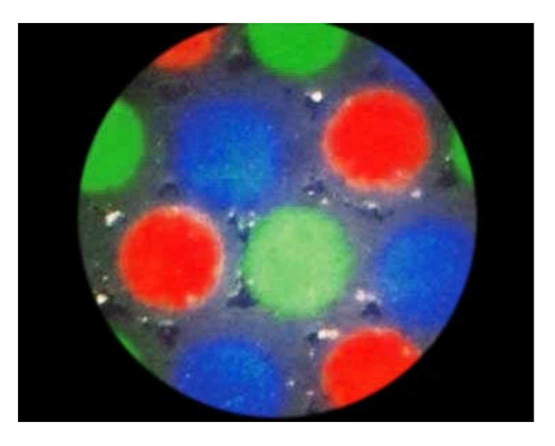
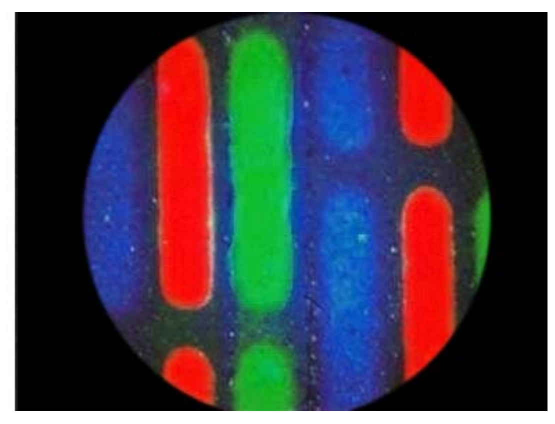



Рис. 21.3 Микрофотографии светящихся экранов 625-строчной телевизионной электронно-лучевой трубки с теневой маской. *Слева*: обычный кинескоп с теневой маской (см. разделы 3.3 и 21.4). *Справа*: копмланарный кинескоп (см. раздел 21.6). Общее увеличние 31 крат. При нормальном просмотровом расстоянии пятна красного, зеленого и синего кардинальных стимулов сливаются в промежуточные стимулы, необходимые для формирвоания изображения (см. раздел 3.3).

Микрофотографии любезно предоставлены Thorn Color Tubes Ltd.

21.7.1 Эйдофор

Оптическая система Эйдофора включает в себя вогнутое зеркало, покрытое тончайшей масляной пленкой, на которой образуется мелкая рябь — т.н. *микроволны*. Эффект микроволн состоит в отклонении светового потока, то есть в его модуляции.

Микроволны образуются за счет сканирования масляной поверхности электронным пучком: по мере сканирования происходит депонирование электронов и образование электронного рельефа (электронного изображения). Там, где образовался заряд электростатические силы деформируют масляную поверхность и, коль скоро степень деформации растет по мере роста заряда, отраженный свет модулируется согласно интенсивности электронного пучка.

Результирующее цветное изображение воспроизводится либо путем тройного проектирования, либо за счет дифракции на единичном зеркале (Glenn, 1970).

21.7.2 GE Talaria

Аналогичный Эйдофору светоклапанный проектор GE Talaria, созданный компанией Texas Instruments[1], относится к категории т.н. *DMD-устройств* — цифровых микрозеркальных устройств (Digital Micromirror Device) (Younce и Monk, 1994), представляющих собой матрицу квадратных микрозеркал, размером 16×16 μm. Свет в данном случае модулируется каждым зеркальцем, отклоняющим этот свет так, что последний либо полностью отражается, либо полностью пропадает по различным участкам изображения.

Цветные изображения воспроизводятся либо за счет классического фильтрового колеса, дающего от 150 до 180 трихроматических кадров в секунду, либо за счет специального устройства свед́ения лучей, построенного из трех отдельных цифровых мик-

[1] Компания по производству электрооборудования и электронных приборов, входит в список «Форчун-500» [Fortune 500]. Штаб-квартира в г. Далласе, шт. Техас. — *Прим. пер.*

розеркальных кристаллов, состоящих, в свою очередь, из дихроичных красноотражающих, зеленоотражающих и синеотражающих микрозеркал (см. рис. 20.8).

Уровни светового потока, достигаемые с помощью светоклапанных проекторов, могут быть очень высокими (к примеру, 7000 лм, в частности — у Эйдофора — см. Приложение А3.5), поскольку свет от источника без прерываний работает по всему изображению.

21.8 ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИ

Если два поляризационных фильтра расположены друг над другом так, что препятствуют прохождению света, то для изменения направления поляризации (вращения плоскости поляризации) и восстановления пропускания могут использоваться специальные жидкие кристаллы. Однако вращение это имеет место только тогда, когда жидкие кристаллы ориентированы в строго заданном направлении. Сие осуществимо с помощью электрического поля переменной мощности, прикладываемого к кристаллам (что и ведет к изменению количества пропускаемого света).

21.8.1 Принцип устройства

Слой жидких кристаллов обычно располагают между прозрачными электродами, параллельными друг другу (и, разумеется, поляризационным фильтрам) и отстоящими друг от друга на одну десятую миллиметра (и даже менее).

В одном из вариантов жидкокристаллического дисплея (рис. 21.4) направление поляризации не меняется, когда кристаллы находятся под прямыми углами к плоскостям, параллельным поляризационным фильтрам, и меняется, когда кристаллы оказываются в иных плоскостях. В данном случае для вращения плоскости поляризации электродные поверхности, содержащие кристаллы, протравливаются так, чтобы кристаллы эти были ориентированы в одном определенном направлении; при этом направление протравки электродов взаимноперпендикулярное. Плавное изменение ориентации кристаллов достигается за счет погружения кристалла на определенную глубину его ячейки, что приводит к равномерному изменению направления поляризации света. При плавном повышении напряжения между электродами, ориентация жидких кристаллов равномерно переходит в положение, перпендикулярное плоскостям поляризационных фильтров и количество пропущенного света плавно падает.

Для воспроизведения изображения с помощью жидких кристаллов необходимо, чтобы один из электродов представлял собой мозаику раздельно адресуемых областей (ячеек). При этом второй электрод у всех ячеек может быть общим. Размер ячеек, которые и создают элементы воспроизводимого изображения (пикселы), обычно равен 0.33 мм или 0.25 мм. Толщина слоя может быть много меньше — 0.1 мм (и даже еще меньше).

Диагональный размер телевизионных жидкокристаллических дисплеев варьирует от 3 до 26 дюймов (и более). Дисплеи малого размера используются в карманных устройствах, таких как видоискатели фото- и видеокамер, мобильные телефоны и пр., но при решении офисных задач желательны диагонали от 17 дюймов и выше.

Чтобы добиться четкости, адекватной широковещательному телевидению, число пикселов в больших дисплеях должно составлять примерно 400000, а в приемниках телевидения высокой четкости — в четыре раза больше (и такие аппараты тоже суще-

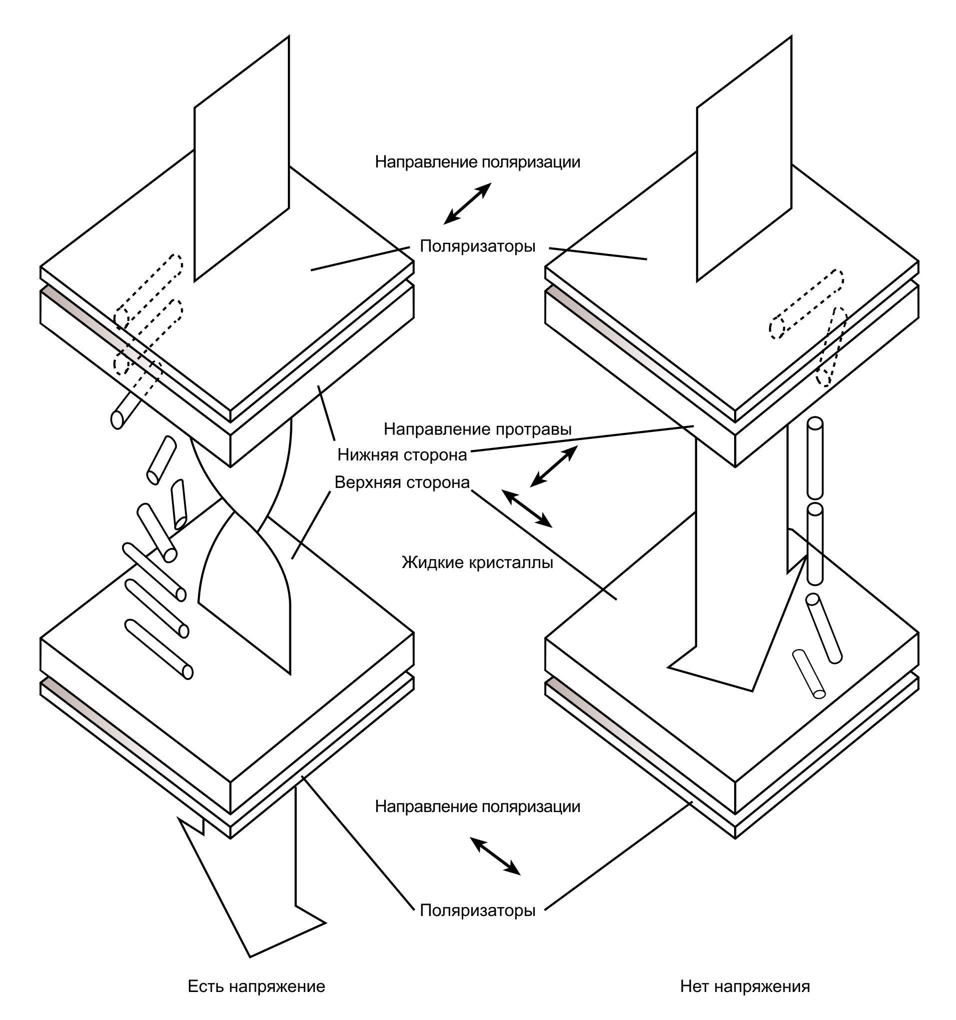


Рис. 21.4 Принцип действия твист-нематической жидкокристаллической ячейки.

ствуют). Отметим, что при таком большом количестве пикселов очень трудно добиться удовлетворительного уровня отбраковки ячеек.

Угол, под которым свет проходит через слой жидких кристаллов влияет на пропускание и, следовательно, при смене угла просмотра возникают изменения в восприятии изображений, воспроизведенных этими дисплеями. ЖК-дисплеи, как правило, конструируются так, чтобы наименее благоприятный угол просмотра был снизу, поскольку это наименее популярное направление просмотра.

Коэффициент пропускания жидкокристаллического слоя также, как правило, зависит от длины волны.

Прочие недостатки обсуждаемых устройств — это: низкое время отклика и слишком высокий уровень минимального пропускания, лежащий выше оптимума воспроизведения темных цветовых стимулов.

21.8.2 Цветовоспроизведение

Существует как минимум два принципиальных способа воспроизведения цветных изображений на жидкокристаллических дисплеях.

21.8.2.1 Мозаика фильтров

Способ состоит в том, что ячейки покрываются регулярной мозаикой красного, зеленого и синего фильтров, а просмотр при этом ведется с такого расстояния, при котором мозаичная структура результирующего стимула не распознается зрением. Отметим, что такая конструкция чревата потерей четкости, если количество пикселов не было утроено.

В качестве источника подсветки используется обыкновенная люминесцентная лампа со специальным рассеивателем. Световую эффективность источника можно повысить за счет выбора трехполосной лампы (см. раздел 10.5), испускающей свет в основном в длинноволновой («красной»), средневолновой («зеленой») и коротковолновой («синей») частях спектра.

Отметим, что фильтровая мозаика может использоваться и в диапроекторах: несмотря на то, что интегральная экранная фотометрическая яркость изображений в этом случае окажется сильно сниженной за счет низкого коэффициента пропускания жидкокристаллической матрицы (обычно всего лишь 4%), результирующее изображение выглядит ярким, если уровень окружающего освещения достаточно низок.

21.8.2.2 Светоделительная система

Еще одним технологическим вариантом воспроизведения цветных изображений на жидкокристаллических экранах является применение светоделительной системы в связке с тремя монохромными жидкокристаллическими матрицами (рис. 21.5): из белого света какого-либо мощного источника дихроичными зеркалами выделяется вначале длинноволновая («красная») составляющая светового потока, затем средневолновая («зеленая») и, наконец, коротковолновая («синяя»). Окрашенные световые потоки падают затем на три монохромных жидкокристаллических дисплея, после прохождения через которые, объединяются второй системой дихроичных зеркал и проектируются общим объективом на экран.

В одном из вариантов конструкции проектора матрица состоит из 756×556 пикселов и количество это не уменьшается фильтровой мозаикой, то есть, общее число пикселов составляет 420336 (что вполне подходит визуализации телесигналов широкого вещания). Плюс к тому, методика позволяет избежать светопотерь, возникающих из-за применения красного, зеленого и синего фильтров, и световой поток в таких проекторах (см. Приложение А3.5) достигает 5000 лм (благодаря чему они вполне пригодны к использованию в больших аудиториях).

Наконец отметим, что высокой фотометрической яркости изображений, воспроизводимых проекционными устройствами, можно достичь за счет замены классического отражающего экрана полупрозрачным экраном задней подсветки.

21.8.3 Субтрактивная визуализация

Относительно недавно были найдены способы субтрактивного цветовоспроизведения с помощью жидкокристаллических дисплеев (см. рис. 21.6): матрица жидких кристаллов подсвечивается источником, дающим белый световой поток с коаксиальным (соосным) ходом лучей. Свет вначале проходит через cyan-поляризационный фильтр, воздействующий только на длинноволновое («красное») содержимое этого потока, после чего монохромная жидкокристаллическая матрица, активированная

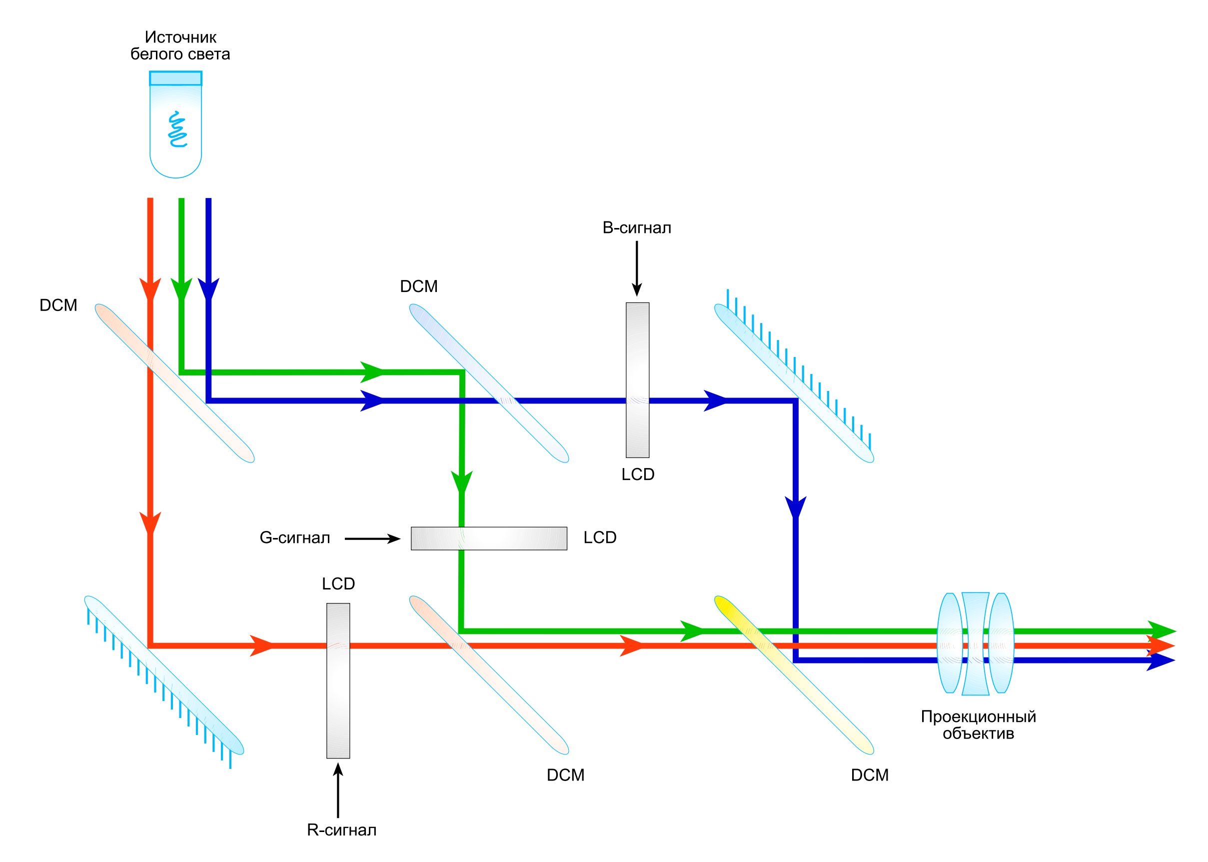


Рис. 21.5 Светоделительный проектор на жидкокристаллических матрицах. DCM — дихроичные зеркала; LCD — жидкокристаллические матрицы.

«красным» трихроматическим телесигналом, управляет длинноволновым («красным») содержимым белого света.

Далее свет проходит через нейтральные поляризаторы, которые отделены друг от друга небольшим просветом, благодаря чему работают как желтый интерференционный фильтр: между этими поляризаторами находятся вторая жидкокристаллическая матрица, активированная «синим» трихроматическим телесигналом, и, следовательно, управляющая коротковолновым («синим») содержимым белого светового потока.

Наконец, свет проходит через третью жидкокристаллическую матрицу, активированную «зеленым» трихроматическим телесигналом, а затем через поляризатор, содержащий magenta-краситель, и воздействующий, соответственно, только на средневолновый («зеленый») свет. То есть степень magenta-фильтрации модулирует средневолновое («зеленое») содержимое белого светового потока.

И последнее: отсутствие фильтров теоретически позволяет повысить общий коэффициент пропускания системы, однако до сих пор не удается выйти на цифры, превышающие 8%, что совершенно неприемлемо.

21.9 ЛАЗЕРНЫЕ ДИСПЛЕИ

В некоторых сферах, в частности таких, где требуются высокие уровни фотометрической яркости изображений, применяются дисплеи, в которых объединяются красный, зеленый и синий лазерные лучи, модулируемые соответствующими электрооп-

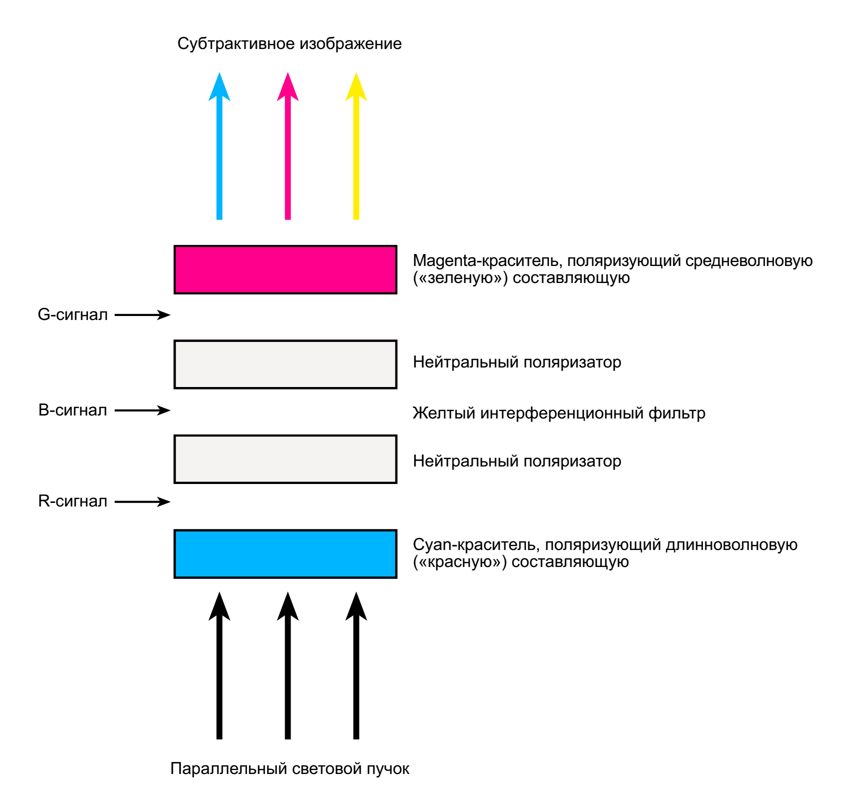


Рис. 21.6 Субтрактивный жидкокристаллический дисплей.

тическими ячейками и выполняющие затем развертку изображения за счет вращающихся или вибрирующих зеркал (Stone, Schlafer и Fowler, 1969). Благодаря высоким уровням фотометрической яркости, достигаемым за счет применения лазеров, дисплеи данного типа пригодны, в том числе, к телезаписи на обычную цветную кинопленку (см. раздел 23.11).

В двухлазерных системах аргоновый лазер дает коротковолновый (синий) и средневолновый (зеленый) кардинальный стимулы, а лазер на красителе, накачанный избыточной энергией аргонового лазера — длинноволновый (красный) кардинальный стимул (Lobb, 1983).

Преимущество лазерных дисплеев перед другими заключено, в первую очередь, в том, что они дают высокое разрешение и высокую интегральную фотометрическую яркость изображения. Недостатки лазерных устройств состоят в нестабильности отклоняющей системы и низкой световой эффективности (к примеру, 10 кВт на 300 лм светового потока).

21.10 ТРУБКИ С ПРОНИКАЮЩИМИ ПУЧКАМИ

Если на внутреннюю поверхность передней стенки кинескопа последовательно нанести слои люминофоров, то коль скоро каждый из слоев воспроизводит «свое» кардинальное изображение, на выходе мы получаем цветовую телерепродукцию оригинальной сцены. Технология требует применения электронных пучков различной степени разгонки, причем на нижний слой должен воздействовать наиболее быстрый из них.

Такие кинескопы именуются «трубками с проникающими пучками» и используются при визуализации цифровых данных, в частности графических.

Один из вариантов трубки с проникающими пучками, содержащей два слоя люминофоров и использующей один пучок переменной разгонки, получил название «*пенетрон*». В пенетроне нет классической строчной развертки, но движущийся пучок либо непосредственно отрисовывает символы, либо наоборот — воспроизводит затененные области (т.н. «штриховка Шеффера» — см. раздел 25.6).

21.11 СВЕТОДИОДНЫЕ ДИСПЛЕИ

21.11.1 Твердотельные диоды

Известно, что существуют т.н. *твердотельные диоды*, испускающие свет, когда к ним прикладывают потенциал. Такие диоды именуются «*светодиодами*» (LED — light emitting diodes) и конструируются так, что под напряжением испускают либо красный свет, либо зеленый, либо синий. Размер светодиодов должен быть достаточно мал, чтобы при рассматривании матрицы таких диодов с определенного расстояния, кардинальные стимулы сливались на сетчатке глаза наблюдателя, образуя тот или иной трихроматический (смесевой) стимул. Отметим, что воспроизведение белого стимула требует того, чтобы зеленых диодов было вдвое больше, чем красных и синих.

Дисплеи на светодиодных матрицах могут воспроизводить стимулы очень высоких фотометрических яркостей, вплоть до 3000 кд/м^2, благодаря чему эти устройства активно применяются при уличном телепоказе (например, на спортивных состязаниях), где размер экрана порой достигает 4×5 м и более.

21.11.2 Органические светодиоды

Органические светодиоды (OLED — organic light emitting diodes) изначально разрабатывались очень мелкими и тонкими.[1] Красносветящийся, зеленосветящийся и синесветящийся органические светодиоды располагаются в матрице вплотную друг к другу в виде стрипов или триад, либо же друг над другом. Последнее позволяет уйти от снижения разрешения, возникающего из-за полосной или точечной структуры матриц.

Когда химическую основу органического диода составляет полимер, то такой диод получает название «полимерного светодиода» (PLED).

21.12 ПЛАЗМЕННЫЕ ДИСПЛЕИ

Известно, что, пропуская электрический ток через некоторые газы, можно инициировать образование плазмы и излучение электромагнитной энергии, в том числе в видимой части спектра. Различные виды плазмы образуются в ртутных парах люминесцентных ламп и в ксеноне электронных вспышек. В телевизионных плазменных дисплеях свечение каждого пиксела вызывается плазмой, образующейся в ячейках матрицы, а ячейки эти активируются в последовательности, требуемой тем или иным стандартом развертки изображения.

Для продукции плазмы используются инертные газы ксенон и неон, но сам плаз-

---

1 Новация, патент и право лицензирования принадлежат компании Eastman Kodak — *Прим. пер.*

менный период при этом столь же короток как в электронных фотовспышках. Однако поскольку каждая ячейка покрыта одним из трех вариантов люминофорного порошка, конвертирующего электромагнитную энергию либо в красный, либо в зеленый, либо в синий свет, период световой эмиссии продлевается до величин, сопоставимых с одним циклом визуализации изображения.

Контраст воспроизводимых изображений можно повысить, покрыв каждую из ячеек красным, зеленым и синим фильтрами, что снижает уровень паразитного отражения света от неактивированных ячеек и снижает фотометрическую яркость черной точки изображений (проще говоря, «делает черный чернее»).

Наконец отметим, что плазменные дисплеи могут иметь очень большой пространственный размер при всего лишь нескольких дюймах толщины.

21.13 ЛЮМИНОФОРЫ АДДИТИВНЫХ ТЕЛЕПРИЕМНИКОВ

На заре цветного телевидения люминофоры телеприемников изготавливались на основе бората кадмия, а позднее фосфата цинка (красное свечение), силиката цинка (зеленое свечение) и кальций-магний силиката (синее). В итоге, цветности кардинальных стимулов, воспроизводимых телеприемниками, были зафиксированы в т.н. NTSC-стандарте (см. гл. 22):

Красный	$x = 0.67$	$y = 0.33$	$u' = 0.477$	$v' = 0.528$
Зеленый	$x = 0.21$	$y = 0.71$	$u' = 0.076$	$v' = 0.576$
Синий	$x = 0.14$	$y = 0.08$	$u' = 0.152$	$v' = 0.195$

Фотометрические яркости изображений, получаемые с такими люминофорами оказались довольно низкими, поэтому в 1961 г. химический состав последних был изменен и в качестве стандартного был принят следующий набор сульфидных люминофоров:

Красный (цинка-кадмия сульфид)	$x = 0.663$	$y = 0.337$	$u' = 0.464$	$v' = 0.531$
Зеленый (цинка-кадмия сульфид)	$x = 0.285$	$y = 0.595$	$u' = 0.119$	$v' = 0.559$
Синий (цинка сульфид)	$x = 0.154$	$y = 0.068$	$u' = 0.175$	$v' = 0.174$

Цветности кардинальных стимулов, воспроизводимых данными люминофорами, отмечены на рис. 21.7 литерой «S» (цветности кардинальных стимулов, воспроизводимых NTSC-люминофорами, даны для сравнения и обозначены литерой «N»). Мы видим, что красносветящийся сульфидный люминофор дает чуть более оранжевый стимул, чем красносветящийся люминофор NTSC; зеленый — чуть более желтый и несколько меньшей колориметрической чистоты, а синий — при той же колориметрической чистоте чуть пурпурнее.

Несмотря на то, что охват цветностей кардинальных стимулов, воспроизводимых сульфидными люминофорами, ощутимо меньше по сине-зеленому и синему секторам, интегральная фотометрическая яркость воспроизводимых изображений оказывается вдвое выше; световая эффективность кинескопа с теневой маской также вдвое выше: вместо 1 лм/Вт (при люминофорах NTSC) — 2 лм/Вт. То есть, благодаря росту фото-

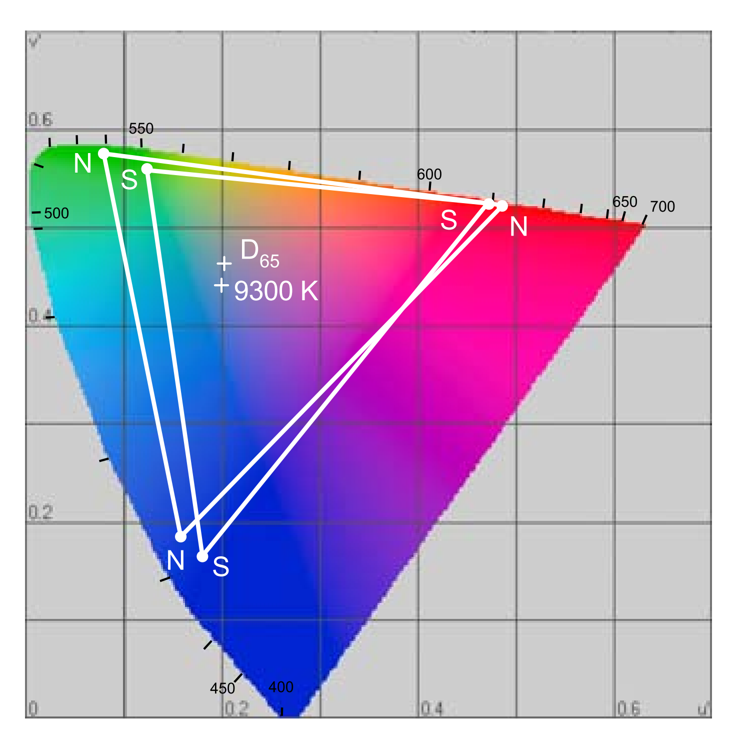


Рис. 21.7 Цветности и охваты цветностей кардинальных стимулов, воспроизводимых: S — сульфидными люминофорами; N — люминофорами NTSC-стандарта.

метрической яркости элементов воспроизводимых изображений полнота цвета этих элементов также растет, несмотря при этом на меньшую колориметрическую чистоту воспроизводящих (кардинальных) стимулов[1] (что было подтверждено экспериментально) — см. раздел 11.9 (Matthews, 1963).

Отметим также, что ежели при сульфидных люминофорах белая точка телеприемника уравнена по цветности с планковским черным телом, нагретым до 9300 К (а не со стандартным CIE-осветителем «С» [6774 К]), как того требует NTSC-стандарт, — световая эффективность кинескопа достигает 2.6 лм/Вт.

В 1964 г. было обнаружено, что соли редкоземельных металлов, в частности, иттрия ванадат, активированный европием, создает красносветящийся люминофор еще большей световой эффективности, чем сульфидный, и при коррелированной цветовой температуре белой точки в 9300 К его светоотдача составляет 2.9 лм/Вт.

На рис. 21.8 даны относительные спектральные распределения энергии кардинальных стимулов, воспроизводимых сульфидными люминофорами (сплошные линии), и спектральное распределение энергии красного кардинального стимула, воспроизводимого европий-иттрий ванадатом (пунктирная линия).

В 1969 г. Европейский телевещательный союз (European Broadcasting Union — EBU) утвердил набор цветностей кардинальных стимулов европейских бытовых телеприемников (BREMA, 1969; Sproson, 1978). В том же 1969 г. Обществом кино- и телеинженеров США (Society of Motion Picture and Television Engineers — SMPTE) был специфицирован набор цветностей кардинальных стимулов американских бытовых

---

[1] Феномен цветового восприятия зрительных стимулов, именуемый «эффектом Ханта» (Фершильд, «Модели цветового восприятия», 2004). — *Прим. пер.*

телеприемников — «SMPTE C». И, наконец, в 1991 г. Международный консультативный комитет по радиовещанию (Comite Consultatif International de la Radiodiffusion — CCIR) в своей «Recommendation 709» принял набор «CCIR 709» для телевидения высокой четкости (DeMarsh, 1993).

Мы видим, что все три набора мало чем отличны друг от друга и в равной степени касаются как светоклапанных, так и жидкокристаллических дисплеев. Однако следует всегда помнить, что окружающий свет, давая паразитную подсветку, может заметно снижать охват цветностей системы.

Красный	EBU	$x = 0.64$	$y = 0.33$	$u' = 0.451$	$v' = 0.523$
	SMPTE C	$x = 0.63$	$y = 0.34$	$u' = 0.433$	$v' = 0.526$
	CCIR 709	$x = 0.64$	$y = 0.33$	$u' = 0.451$	$v' = 0.523$
Зеленый	EBU	$x = 0.29$	$y = 0.60$	$u' = 0.121$	$v' = 0.561$
	SMPTE C	$x = 0.31$	$y = 0.595$	$u' = 0.130$	$v' = 0.562$
	CCIR 709	$x = 0.30$	$y = 0.60$	$u' = 0.125$	$v' = 0.562$
Синий	EBU	$x = 0.15$	$y = 0.06$	$u' = 0.175$	$v' = 0.158$
	SMPTE C	$x = 0.155$	$y = 0.07$	$u' = 0.176$	$v' = 0.178$
	CCIR 709	$x = 0.15$	$y = 0.06$	$u' = 0.175$	$v' = 0.158$

На рис. 21.9 даны цветности EBU-набора (и его допуски); там же — цветности кардинальных стимулов NTSC-стандарта. Любопытно отметить закономерные изменения в согласованных с этими наборами трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (рис. 19.8): смещение цветности нового зеленого кардинального стимула в красном направлении ведет к тому, что «красная» трихроматическая кривая имеет более выраженный отрицательный участок в средневолновой («зеленой») части видимого спектра.

Наконец отметим, что отклонение цветностей люминофоров от NTSC-стандарта влияет на теоретические величины коэффициентов l, m и n, используемых в комплектовании яркостного сигнала (см. раздел 22.3). Однако степень этих отклонений оказывается слишком маленькой для того, чтобы иметь хоть какое-то практическое значение.

21.14 ЦВЕТНОСТЬ БЕЛОЙ ТОЧКИ

21.14.1 Белая точка телекамеры

Как было показано в разделах 5.7 и 19.8 телекамеры обычно конструируются так, чтобы равновеликие «красный», «зеленый» и «синий» сигналы возникали в ответ на свет от стандартной белой поверхности, какой бы при этом ни была цветность ее освещения. Такая конструкция хороша тем, что позволяет имитировать эффекты сенсорной адаптации зрения, в значительной степени компенсирующей изменения в цветности освещения сцены (в результате чего цветовое восприятие ее стимулов остается более или менее постоянным). Еще одним важным обстоятельством является то, что вне зависимости от цветности освещения цветоразностные сигналы остаются равными нулю не только по белым, но и по серым и черным стимулам.

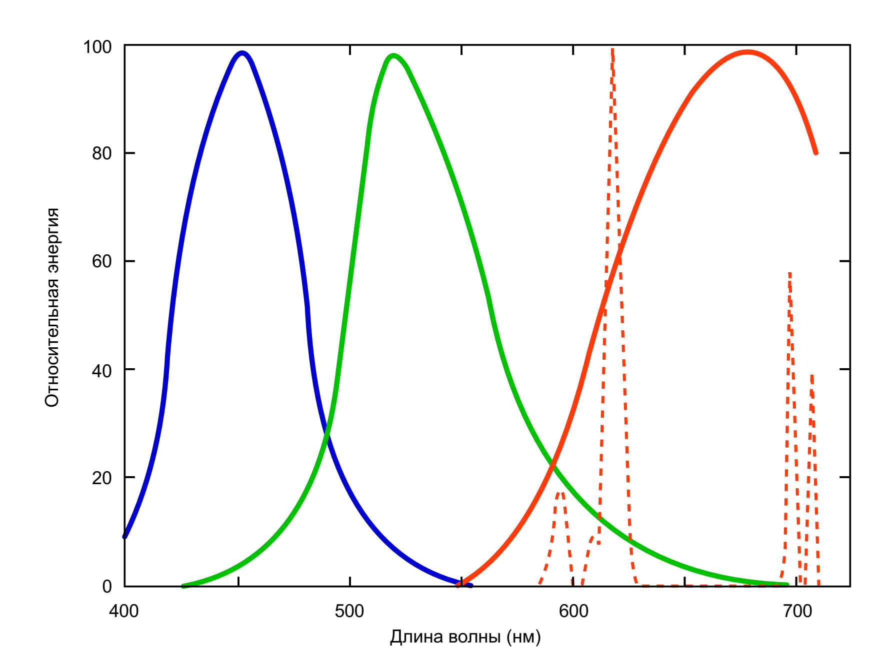


Рис. 21.8 Относительные спектральные распределения энергии кардинальных стимулов, воспроизводимых сульфидными люминофорами (сплошные линии) и красный кардинальный стимул, воспроизводимый люминфором на основе иттрия ванадата, активированного европием (пунктирные линии).

21.14.2 Белая точка телеприемника

В NTSC-системе яркостный сигнал компонуется, исходя из того допущения, что равновеликие значения «красного», «зеленого» и «синего» сигналов ведут к воспроизведению экраном телеприемника стимула с цветностью стандартного С-осветителя CIE. Следовательно, уравнивание «красного», «зеленого» и «синего» сигналов телекамеры по белому эталону при том или ином фактическом освещении всегда ведет к тому, что экран приемника воспроизводит стимул с той же цветностью, что и у стандартного С-осветителя.

Следовательно, в монохромных дисплеях фотометрические яркости изображений объектов сцены будут *аналогичны* оригинальным под стандартным С-осветителем (и *идентичны* им, если уравнивание «красного», «зеленого» и «синего» сигналов окажется эквивалентным использованию соответствующего спектро-конверсионного фильтра — см. раздел 10.3). Однако же, к примеру, рост фотометрических яркостей красноокрашенных объектов сцены под светом лампы накаливания не будет передан, но при этом эффект данного типа не столь уж важен (мы знаем, что, например, в черно-белой фотографии спектральная чувствительность фотоматериалов шире, чем требуется корректному воспроизведению яркостей [Mouchel, 1963]).

Когда цветные дисплеи воспроизводят стимул с цветностью стандартного С-осветителя за счет равновеликих сигналов (как того требует NTSC-стандарт), то все стимулы изображения будут воспроизведены примерно с теми цветностями, каковы были бы у объектов сцены при стандартном С-освещении.

Отметим, что цветности белого, отличные от таковой у стандартного С-осветителя, могут повлиять на теоретические величины коэффициентов «l», «m» и «n», исполь-

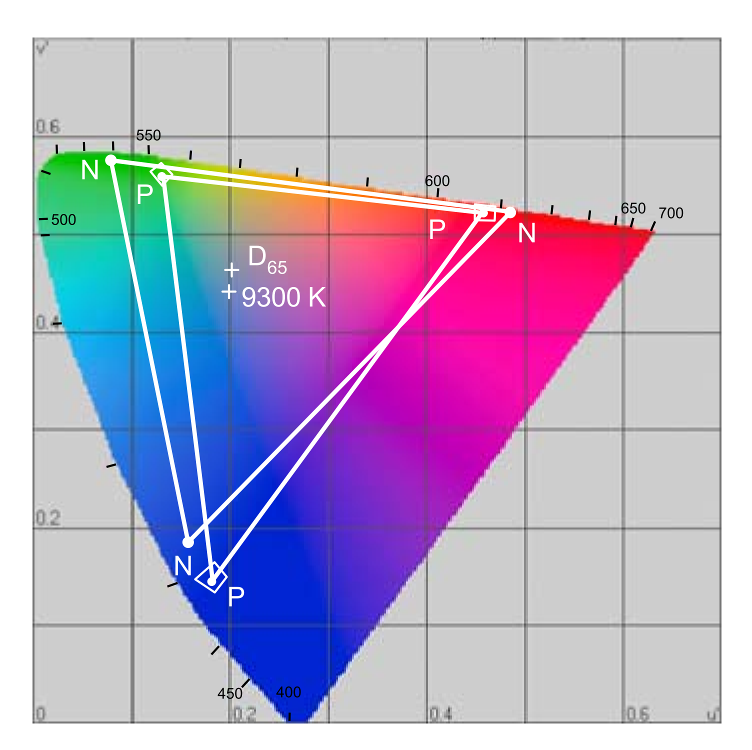


Рис. 21.9 Цветности (P) и охваты цветностей кардинальных стимулов, воспроизводимых домашними телеприемниками в сравнении с цветностями и охватом цветностей кардинальных стимулов NTSC-стандарта (а также допуски на них [обозначены прямоугольниками]) (B.R.E.M.A., 1969).

зуемых для комплектования яркостного сигнала (см. раздел 22.3), однако вновь степень этих отклонений оказывается слишком маленькой для того, чтобы иметь какое-то практическое значение.

21.14.3 Цветовое восприятие телеизображений и адаптация зрения

Результат цветового восприятия стимулов, воспроизводимых экраном телеприемника, зависит от условий просмотра телепередачи: при свете ламп накаливания изображение в целом воспринимается синеватым, а при холодном дневном свете (окна на север) — желтоватым.

Коль скоро просмотр телепередач проходит в основном в вечернее время, то, казалось бы, предпочтительно, чтобы равновеликие сигналы воспроизводили стимулы с цветностью стандартного A-осветителя (2856 K). Однако в этом случае телеизображение при дневном свете становится неприемлемо желтым[1]. С другой стороны, если равновеликие сигналы воспроизводят стимулы с цветностью дневного света, скажем, с цветностью стандартного D_{65}-осветителя (6500 K), изображения при свете ламп накаливания не станут восприниматься неприемлемо синими, поскольку, во-первых, просмотр телепередач чаще всего происходит именно при свете ламп накаливания[2], а во-вторых, — для того, чтобы стимулы, воспроизводимые экраном телеприемника, за-

[1] Как показывает практика «неприемлемо желтым» оно окажется даже при самих лампах накаливания, поскольку свет последних когнитивно обесцвечивается зрительной системой наблюдателя (Фершильд, 2004) — *Прим. пер.*

дали статус зрительной адаптации наблюдателя, интенсивность внешнего освещения можно существенно снизить. Кстати говоря, именно по этим причинам коррелированная цветовая температура белой точки бытовых телеприемников обычно не бывает меньше 6500 К.

Стоит отметить, что чем выше интегральная фотометрическая яркость телеизображения, тем выше его влияние на адаптацию зрения. Относительные световые эффективности люминофоров цветных дисплеев таковы, что по мере роста коррелированной цветовой температуры белой точки растет фотометрическая яркость изображений. В эпоху черно-белого телевидения коррелированные цветовые температуры белой точки лежали в районе 9300 К, поэтому именно под это значение в свое время подгонялся равновеликий сигнал по трем каналам телевидения цветного. Однако с помощью современных люминофоров при 6500 К достижимой оказывается та же фотометрическая яркость, что ранее при 9300 К (Hirsch, 1968; Lamont, 1968).

Оптимальная цветность равносигнального белого зависит от ряда факторов, но опытным путем установлено, что по большинству вариантов домашнего телепросмотра оптимум лежит в диапазоне 6500-9300 К. Однако предпочтительным при этом является все же нижнее значение этого коридора (то есть, 6500 К) (Zwick, 1973).

В Европе в качестве стандартного был выбран D_{65}-осветитель (коррелированная цветовая температура примерно 6500 К) (BREMA, 1969) и он же принят в качестве стандартного в телевидении высокой четкости (см. раздел 19.16).

В жидкокристаллических дисплеях источник света и фильтровое оснащение выбираются так, чтобы результирующий белый лежал в диапазоне 6500-9300 К. В проекционном телевидении допуски на цветность белого много больше, поскольку проекционное изображение полностью определяет статус адаптации наблюдателя. То есть, жидкокристаллическим дисплеям вполне подойдут газоразрядные лампы на 6000 К, а диапрокеторам — лампы накаливания на 3000 К.

И последнее: следует всегда помнить, что при телесъемке компенсация изменений в цветности освещения сцены не должна быть полной, поскольку адаптация зрения наблюдателя всегда неполна (см. разделы 8.10 и гл. 34). К примеру, сцена при свечах должна воспроизводиться слегка желтоватой, дабы результат восприятия ее изображения уравнялся с оригинальным восприятием этой сцены.

21.15 ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ЯРКОСТЬ БЕЛОЙ ТОЧКИ

Применение редкоземельных люминофоров позволило в свое время кинескопам с теневой маской выйти на фотометрические яркости белой точки порядка 50 кд/м^2. Если экран имеет ту же фотометрическую яркость при всех углах наблюдения, это соответствует световой эмиссии порядка 50π или 160 лм/м^2. Следовательно, интегральная световая эмиссия экрана площадью 0.15 м^2 будет равна 24 лм. При светоотдаче 3 лм/Вт потребуется примерно 8 Вт мощности или ток пучка порядка 0.3 мА при 25 кВ напряжения на аноде.

Последние усовершенствования люминофоров, в частности, такие как применение оксисульфида иттрия (активированного европием) для воспроизведения красного кардинального стимула, и цинк-кадмия сульфида (активированного медью) — для зеленого, позволяют выйти на фотометрические яркости по белой точке порядка

[2] Здесь автор вскользь касается проблемы влияния культурных факторов на результат цветового восприятия изображений. — *Прим. пер.*

85 кд/м^2, а небольшие изменения в цветностях кардиналов и определенная модификация технологии производства масок позволяют повысить этот показатель до 120 кд/м^2 (Wright, 1971).

Заполнив пустоты между люминофорными точками специальным светопоглощающим веществом, можно повысить коэффициент пропускания передней поверхности трубки (которая обычно изготавливается серой, дабы снизить эффект внешней паразитной подсветки) и тем самым еще поднять фотометрическую яркость белой точки дисплея.

Отметим, что высокая интегральная фотометрическая яркость экранных изображений желательна, во-первых, потому, что полнота цвета элементов этих изображений растет по мере роста фотометрической яркости; во-вторых, потому, что высокие значения яркости не столь вредят зрению при низких уровнях окружающего освещения. Вместе с тем, нельзя забывать, что чем выше фотометрическая яркость изображений, тем заметнее мелькание при смене кадров.

21.16 ОТРАЖАЮЩИЕ ДИСПЛЕИ

Результат восприятия экранных изображений часто страдает из-за наличия внешнего освещения, приводящего к визуальному затемнению этих изображений благодаря явлению т.н. *симультанного контраста*, а также снижению чистоты цвета элементов изображения и падению его контраста из-за паразитной подсветки темных и черных элементов. Решением данной проблемы является применение не самосветящихся дисплеев, а отражающих.

21.1.7 Аддитивные отражающие дисплеи

Аддитивные отражающие дисплеи могут содержать матрицы красных, зеленых и синих фильтров и блок светомодуляции, реализуемый, скажем, на базе жидких кристаллов (либо же за счет слоя серого колоранта, оптическая плотность которого может меняться, например, путем электрофореза).

Вместе с тем, неизбежное (и в данном контексте — паразитное) поглощение света фильтрами ограничивает максимальный коэффициент отражения 30%. В решении этой проблемы могут использоваться многослойные устройства, каждый слой которых регулирует количества красного, зеленого и синего кардинальных стимулов за счет специфического вещества (в частности, такого как жидкий кристалл с диспергированным полимером [Polymer Dispersed Liquid Crystal — PDLC]), управляющего светоабсорбцией, либо использующее т.н. *брэгговское отражение* (интерференцию). Отметим, что данная технология используется в некоторых рекламных щитах.

21.1.8 Субтрактивные отражающие дисплеи

Субтрактивный вариант отражающего дисплея по-прежнему не находит практического применения, поскольку очень сложен в устройстве. Однако же в сравнении с аддитивными системами он обеспечивает большее разрешение при том же размере пикселов и, по крайней мере теоретическую, возможность достичь максимального коэффициента отражения, сопоставимого с таковым у обычной офисной бумаги.

Некоторые портативные электронные устройства задействуют т.н. *прозрачно-отражающие* (полупрозрачные) дисплеи, в которых каждый пиксел состоит из пропускаю-

щей области, подсвечиваемой сзади, и отражающей области — освещаемой внешним светом (Silverstein, 2003).[1]

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

B.R.E.M.A., Radio and Electronic Engineer, 38, 201 (1969).
DeMarsh, L., SMPTE J., 102, 1095 (1993).
Federman, F., and Pomicter, D., J. Roy. Television Soc., 16, vii (May–June, 1977).
Glenn, W.E., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 79, 788 (1970).
Hirsch, C.J., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 77, 202 (1968).
Hunt, R.W.G., J. Phot. Sci., 13, 108 (1965).
Jesty, L.C., Proc. Inst. Elec. Engnrs., 105B, 425 (1958).
Jones, L.A., and Condit, H.R., J. Opt. Soc. Amer., 31, 651 (1941).
Kays, R., Image Technology, 69, 155 (1987).
Lamont, H.R.L., J. Roy. Television Soc., 12, 62 (1968).
Law, H.B., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 86, 214 (1977).
Lobb, D.R., S.P.I.E. Proc., 18, Advances in laser scanning and recording, Geneva (1983).
MacDonald, L.W., and Lowe, A.C., Display Systems, Design and Applications, Wiley, Chichester (1997).
Marconi, Marconi Companies and their People, 19, 8 (February 1969).
Matthews, J.A., Private communication (1963).
Mouchel, P., J. Phot. Sci., 11, 291 (1963).
Neate, J., Television, 23, 344 (1973).
Silverstein, L.D. Proceedings of the International Display Manufacturing Conference (Taipei, Taiwan),
15–18 (2003).
Sproson, W.N., Proc. I.E.E., 125, 603 (1978).
Sproson, W.N., Colour Science in Television and Display Systems, p. 100, Adam Hilger, Bristol (1983).
Stone, S.M., Schlafer, J., and Fowler, V.J., J. Information Display, p. 41 (January 1969).
Venis, R.J., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 379 (1969).
Wentworth, J.W., Color Television Engineering, McGraw Hill, New York, p. 153 (1955).
Wright, W.W., J. Roy. Television Soc., 13, 221 (1971).
Younse, J.M. and Monk, D.W., Image Technology, 76, 32 (1994).
Zwick, D.M., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 82, 284 (1973).

[1] Широко применяются в наручных часах, мобильных и стационарных телефонах. — *Прим. пер.*

22 NTSC, PAL И SECAM

22.1 ВВЕДЕНИЕ

В 1953 г. Национальный комитет по телевизионным стандартам США (National Television Standards Committee — NTSC) предложил систему трансляции сигналов цветного телевидения, использующую одновременно как принцип перенасыщения полосы, так и принцип перенасыщения несущей (Lougren, 1953). В том же 1953 г. система NTSC была принята Федеральной комиссией по средствам связи США (Federal Communications Commission — FCC[1]) к общему использованию на всей территории Соединенных Штатов. В настоящей главе мы подробно рассмотрим эту систему, дабы продемонстрировать то, как ее особенности согласуются с ее основными принципами. Колориметрические вычисления будут представлены детально, дабы имелась возможность оценить взаимосвязь между отдельными системными элементами. Также мы рассмотрим две дочерних модификации NTSC — системы PAL и SECAM.

22.2 NTSC-ЦВЕТНОСТИ

NTSC-система ориентирована на использование с телеприемниками, кардинальные стимулы которых имеют следующие координаты цветности:

Красный (R)	$x = 0.67$	$y = 0.33$	$z = 0.00$	$u' = 0.477$	$v' = 0.528$
Зеленый (G)	$x = 0.21$	$y = 0.71$	$z = 0.08$	$u' = 0.076$	$v' = 0.576$
Синий (B)	$x = 0.14$	$y = 0.08$	$z = 0.78$	$u' = 0.152$	$v' = 0.195$
Белый (S_C)	$x = 3.10$	$y = 3.16$	$z = 0.374$	$u' = 0.201$	$v' = 0.461$

Позиции кардинальных стимулов и белого стимула на $u'v'$-диаграмме даны на рис. 22.1.

Как было показано в 7-й главе выбор цветностей воспроизводящих (т.е. кардинальных) стимулов предполагает то, что телекамера отвечает критерию Лютера — Айвса, т.е. что ее спектральные чувствительности соответствуют трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя (в разделе 19.12 мы описали различные технологические варианты аппроксимации этих кривых, и в текущей главе будем исходить из того допущения, что аппроксимация эта выполнена на должном уровне).

---

1 Федеральная [правительственная] комиссия США по [средствам] связи. ФКС орган американского правительства, занимающийся нормативными документами в области связи по спутниковым, телефонным, телеграфным и радиоканалам. Наблюдает за соблюдением стандартов на электронные и электромагнитные излучения, лицензирует средства радиосвязи и контролирует их использование. Создана в 1934 г. http://www.fcc.gov — *Прим. пер.*

22.3 ЯРКОСТНЫЙ СИГНАЛ

NTSC-стандарт позиционирует использование яркостного (E_Y) и двух цветоразностных сигналов ($E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$), организуемых так, что последние в ответ на стимул с цветностью стандартного C-осветителя равны нулю (S_C)[1]. Явное преимущество такого подхода состоит в том, что по черным, серым и белым объектам, освещенным дневным светом, сжатая полоса пропускания цветоразностных сигналов используется по минимуму.

Напомним, что от выбора цветности визуально нейтральных стимулов сцен, при которой цветоразностные сигналы равны нулю, а также от выбора цветностей кардинальных красного, зеленого и синего стимулов, зависят коэффициенты «*l*», «*m*» *и* «*n*» в уравнении:

$$E_Y = lE_R + mE_G + nE_B,$$

где $l + m + n = 1$ (см. раздел 19.8).

Значения коэффициентов можно вычислить, исходя из законов смешения цветовых стимулов[2] и с использованием любой подходящей диаграммы цветностей. Мы будем в основном использовать *xy*-диаграмму, однако отметим, что те же данные можно получить и с помощью диаграммы $u'v'$ (да и с помощью многих других).

Фотометрические яркости L_X и L_Z гипотетических кардинальных стимулов X и Z, взятых в единичном количестве, равны нулю, поэтому фотометрическую яркость L_Y гипотетического кардинального стимула Y, взятого в единичном количестве, можно свободно приравнять к 1. Если количества R-, G- и B-стимулов, измеренных в фотометрических единицах (то есть, в канделах на кв. метр), обозначить соответственно как «R_L», «G_L» и «B_L»,[3] мы можем записать:

$$0.33(R_L) \equiv 0.67(X) + 0.33(Y) + 0.00(Z)$$
$$0.71(G_L) \equiv 0.21(X) + 0.71(Y) + 0.08(Z)$$
$$0.08(B_L) \equiv 0.14(X) + 0.08(Y) + 0.78(Z)$$

Однако по эталонному белому стимулу сцены (S_C) отклик телекамеры во всех трех каналах равновелик ($E_R = E_G = E_B$), и, следовательно, для воспроизведения белого (S_C) соответствующие количества кардинальных R-, G- и B-стимулов телеприемника также должны быть равны между собой. Следовательно, мы можем записать:

$$(S_C) \propto 0.333(R) + 0.333(G) + 0.333(B)$$

Однако, когда количества кардинальных R-, G- и B-стимулов телеприемника выражены в фотометрических единицах (количество S_C-стимула, выраженное в фотометрических единицах, обозначено как S_{CL}), приведенное выше выражение приобретает следующий вид:

---

1 На текущий момент мы не принимаем во внимание необходимость гамма-коррекции, и сложности, возникающие с ее применением, будут обсуждаться позднее.

2 Т.н. законы Грассмана. — *Прим. пер.*

3 Подстрочный индекс «L» означает «luminance» — фотометрическая яркость. — *Прим. пер.*

$$0.333l(\mathrm{R_L}) + 0.333m(\mathrm{G_L}) + 0.333n(\mathrm{B_L}) \equiv 0.333(l+m+n)(\mathrm{S_{CL}}),$$

поскольку l, m и n пропорциональны фотометрическим яркостям (L_R, L_G и L_B) единичных колориметрических количеств кардинальных RGB-стимулов (см. раздел 19.8). Но коль скоро $l + m + n = 1$, уравнение для S_{CL} сокращается до:

$$1.0(\mathrm{S_{CL}}) \equiv l(\mathrm{R_L}) + m(\mathrm{G_L}) + n(\mathrm{B_L})$$

Следовательно:

$$\begin{aligned} & (0.67l/0.33)(\mathrm{X}) + l(\mathrm{Y}) + (0.00l/0.33)(\mathrm{Z}) \\ 1.0(\mathrm{S_{CL}}) \equiv & +(0.21m/0.71)(\mathrm{X}) + m(\mathrm{Y}) + (0.08m/0.71)(\mathrm{Z}) \\ & +(0.14n/0.08)(\mathrm{X}) + n(\mathrm{Y}) + (0.78n/0.08)(\mathrm{Z}) \end{aligned}$$

Однако у нас также имеется уравнение по стимулу S_C, выраженному в фотометрических единицах:

$$\begin{aligned} 0.316(\mathrm{S_{CL}}) &\equiv 0.310(\mathrm{X}) + 0.316(\mathrm{Y}) + 0.374(\mathrm{Z}) \\ 1.0(\mathrm{S_{CL}}) &\equiv (0.310/0.316)(\mathrm{X}) + 1.0(\mathrm{Y}) + (0.374/0.316)(\mathrm{Z}) \end{aligned}$$

Сравнивая два выражения для $1.0(\mathrm{S_{CL}})$, получим:

$$\begin{aligned} 0.67l/0.33 + 0.21m/0.71 + 0.14n/0.08 &= 0.310/0.316 \\ l + m + n &= 1 \\ 0.00l/0.33 + 0.08m/0.71 + 0.78n/0.08 &= 0.374/0.316 \end{aligned}$$

Обычным путем решив эти три уравнения для l, m и n, придем к:

$$l = 0.299 \quad m = 0.587 \quad n = 0.114$$

Следовательно, яркостный сигнал в NTSC-системе можно рассчитать, следующим образом:

$$E_Y = 0.299E_R + 0.587E_G + 0.114E_B$$

Отметим, что l-, m- и n-значения универсальны и используются даже тогда, когда спектральные чувствительности телекамеры согласованы с иными наборами люминофоров[1] и белых точек телеприемников.

22.4 УРАВНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ RGB В XYZ

Вычисление l-, m- и n-значений позволяет написать уравнения преобразования между RGB- и XYZ-системами. Имеем:

---

1 Следовательно, с иными наборами кардинальных стимулов — *Прим. пер.*

$$0.299(R_L) \equiv 1.0(R)$$
$$0.587(G_L) \equiv 1.0(G)$$
$$0.114(B_L) \equiv 1.0(B)$$

Поскольку:

$$0.33(R_L) \equiv 0.67(X) + 0.33(Y) + 0.00(Z),$$

получаем:

$$1.0(R) \equiv 0.299(R_L) \equiv (0.299/0.33)(0.67(X) + 0.33(Y) + 0.00(Z))$$

Аналогично:

$$1.0(G) \equiv 0.587(G_L) \equiv (0.587/0.71)(0.21(X) + 0.71(Y) + 0.08(Z))$$
$$1.0(B) \equiv 0.114(G_L) \equiv (0.114/0.08)(0.14(X) + 0.08(Y) + 0.78(Z))$$

Путем алгебраического упрощения получим:

$$1.0(R) \equiv 0.607(X) + 0.299(Y) + 0.000(Z)$$
$$1.0(G) \equiv 0.174(X) + 0.587(Y) + 0.066(Z)$$
$$1.0(B) \equiv 0.200(X) + 0.114(Y) + 1.111(Z)$$

Уравнения обратного преобразования см. в разделе 22.17.

22.5 ДЕВИАЦИЯ ЦВЕТОРАЗНОСТНОГО СИГНАЛА

То, что колебание цветоразностных сигналов ($E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$) по-разному сказывается на цветности воспроизводимых стимулов можно продемонстрировать, построив сетку линий (рис. 22.1). Такое построение легче всего выполнить, нанеся на диаграмму цветностей позиции стимулов S_C, C_R и C_B, соответствующих переменным E_Y, $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$. То, как найти эти позиции, мы опишем ниже.[1]

Взаимоотношения между сигналами можно записать как (см. раздел 19.8):

$$E_R = (1.0)(E_R - E_Y) + (1.0)E_Y + 0(E_B - E_Y)$$
$$E_G = -(l/m)(E_R - E_Y) + (1.0)E_Y - (n/m)(E_B - E_Y)$$
$$E_B = 0(E_R - E_Y) + (1.0)E_Y + (1.0)(E_B - E_Y)$$

Ежели на сей момент мы сделаем такое допущение, что оптические сигналы R, G, B и L пропорциональны электрическим сигналам E_R, E_G, E_B и E_Y соответственно, то мы можем написать, что $R = kE_R$, $G = kE_G$, $B = kE_B$ и $L = kE_Y$, где $k = \text{const}$. Следовательно:

---

[1] Отметим, что стимулы C_R и C_B — гипотетические, поскольку позиции их цветностей лежат за пределами спектрального локуса диаграммы — *Прим. пер.*

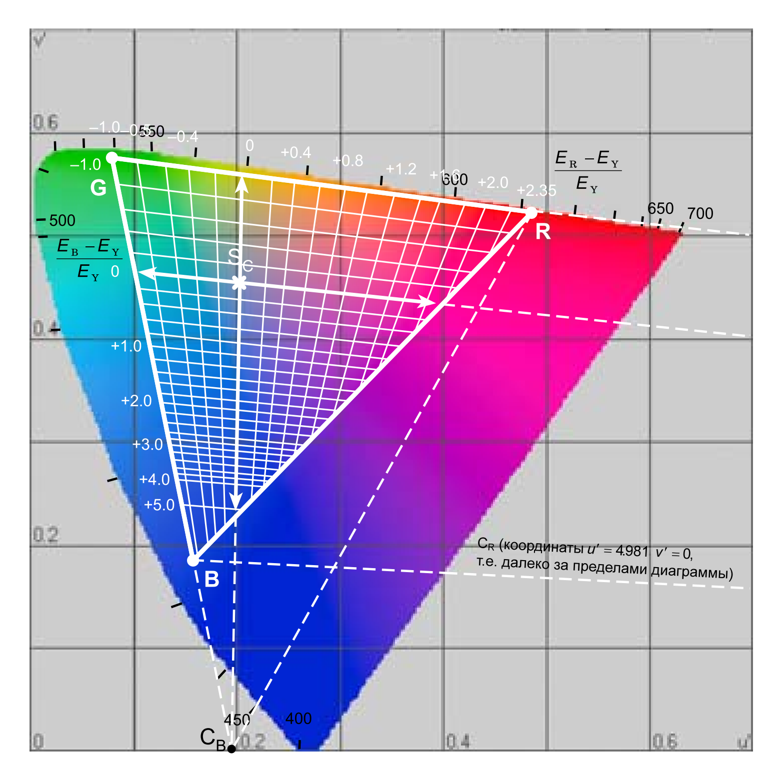


Рис. 22.1 Треугольник, образованный точками, представляющими цветности кардинальных (воспроизводящих) *RGB*-стимулов телеприемника NTSC-стандарта. S_C — цветность Стандратного C-осветителя: стимул уравнен равными колориметрическими количествами кардинальных RGB-стимулов. Точка S_C представляет позицию стимула, соответствующую переменной L. Точки C_R, и C_B представляют позиции *гипотетических* стимулов, соответствующих переменным $R - L$, L и $B - L$, где $L = 0.299R + 0.587G + 0.114B$. Линии, которые при своем графическом продолжении за границы NTSC-охвата, пересекутся в точке C_B, представляют цветности стимулов, воспроизводимых при $(R - L)/L = \text{const}$; аналогично те линии, что пересекутся в точке C_R (лежит за пределами рисунка), представляют цветности стимулов, воспроизводимых при $(B - L)/L = \text{const}$. Поскольку E_R, E_G, E_B и E_Y пропорциональны R, G, B и L соответственно, то существуют также линии, характеризующие цветности стимулов, воспроизводимых при $(E_R - E_Y)/E_Y = \text{const}$ и $(E_B - E_Y)/E_Y = \text{const}$ (сетка линий).

$$R = (1.0)(R - L) + (1.0)L + 0(B - L)$$
$$G = -(l/m)(R - L) + (1.0)L - (n/m)(B - L)$$
$$B = 0(R - L) + (1.0)L + (1.0)(B - L)$$

Таким образом, соответствующие уравнения для стимулов S_C, C_R и C_B можно записать как (см. раздел 8.4):

$$1.0(C_R) \equiv (1.0)(R) - (l/m)(G) + 0(B)$$
$$1.0(S_C) \equiv (1.0)(R) + (1.0)(G) + 1.0(B)$$
$$1.0(C_B) \equiv 0(R) - (n/m)(G) + (1.0)(B)$$

Следовательно, используя формулу преобразования RGB → XYZ, получим:

$$1.0(C_R) \equiv 0.607(X)+0.299(Y)+0.000(Z)-(0.299/0.587)(0.174(X)+0.587(Y)+0.066(Z))$$
$$1.0(S_C) \equiv (0.607+0.174+0.200)(X)+(0.299+0.578+0.114)(Y)+(0.000+0.066+1.111)(Z)$$
$$1.0(C_B) \equiv -(0.114/0.587)(0.174(X)+0.587(Y)+0.066(Z))+0.200(X)+0.114(Y)+1.111(Z)$$

Уравнение можно упростить до:

$$1.0(C_R) \equiv 0.518(X)+0.000(Y)-0.034(Z)$$
$$1.0(S_C) \equiv 0.981(X)+1.000(Y)+1.177(Z)$$
$$1.0(C_B) \equiv 0.166(X)+0.000(Y)+1.098(Z)$$

Значения «x» и «y» можно вычислить, разделив каждый из коэффициентов на $X+Y+Z$, а из полученных величин получить затем соответствующие $u'v'$-значения:

	x	y	u'	v'
(C_R)	1.070	0	4.981	0
(S_C)	0.310	0.316	0.201	0.461
(C_B)	0.131	0	0.191	0

Позиции стимулов на $u'v'$-диаграмме даны на рис. 22.1.

Как и ожидалось полученные значения указывают на то, что S_C находится в позиции Стандартного С-осветителя. Для C_R и C_B значения y (и v') равны нулю; то есть, стимулы X, Z, U′, а также стимулы C_R и C_B влияют только на цветность, но не на фотометрическую яркость стимулов результирующих. Данный тезис доказывается уравнением:

$$1.0(C_R) \equiv 1.0(R)-l/m(G),$$

которое в том случае, когда величины R и G даны в фотометрических единицах, превращается в:

$$1.0(C_R) \equiv l(R_L)-(l/m)m(G_L) \equiv l-(R_L)-l(G_L)$$

Таким образом, фотометрическая яркость $1.0(C_R)$ равна $l-l$, то есть — нулю. Аналогично:

$$1.0(C_B) \equiv -(n/m)m(G_L)+n(B_L) \equiv -n(G_L)+n(B_L)$$

Следовательно, фотометрическая яркость $1.0(C_B)$ тоже равна нулю.

22.5.1 Локусы цветностей при постоянных $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$

Из рис. 22.1 видно, что точка C_B лежит на бесконечной линии, образованной точками G и B. Так получается потому, что позиция C_B соответствует тому случаю, когда величины сигналов $E_R - E_Y$ и E_Y обе равны нулю, при условии, что величина E_R тоже равна нулю. Следовательно, гипотетический стимул C_B представляет собой смесь лишь двух стимулов — G и B; то есть, позиция этого стимула будет лежать либо на отрезке GB, либо где-то за пределами этого отрезка, но на линии, образованной точками G и B.

Аналогично гипотетический стимул C_R, который соответствует $E_B - E_Y = 0$ и $E_Y = 0$ (при том, что E_B равен нулю), является смесью только R- и G-стимулов. Несмотря на то, что позиция стимула C_R далека от правой части рис. 22.1, точка эта фактически находится на бесконечной линии, образованной точками G и R.

Стоит сказать, что, вычертив веер линий, исходящих из точки C_B, мы получим локусы изменений цветности, согласующиеся только с изменениями величины $E_B - E_Y$. Аналогичный веер, расходящийся из точки C_R, образует локусы изменений цветности, согласующиеся только с изменениями величины сигналов $E_R - E_Y$.

Полный смысл обоих вееров можно продемонстрировать, взяв любой треугольник цветностей (в частности тот, что показан на рис. 22.2): мы видим, что для любой линии, проходящей через точку B, величина r будет пропорциональна g, и, следовательно, если s — это наклон этой линии, то:

$$g = sr$$

Следовательно, все точки на всех линиях, проходящих через позицию B, обладают тем свойством, что $r/g = \text{const}$. Однако коль скоро $r = R/(R+G+B)$ и $g = R/(R+G+B)$ верным окажется и то, что ежели $r/g = \text{const}$, то и $R/G = \text{const}$. По линиям, проходящим через точку R:

$$\begin{aligned} g &= s(1-r) \\ &= s(r+g+b-r) \\ &= sg+sb \end{aligned}$$

Следовательно:

$$G/B = g/b = s/(1-s)$$

Аналогично по линиям, проходящим через точку G:

$$B/R = b/r = (1-s)/s$$

Таким образом, по линиям, радиально расходящимся:

— из точки R $\rightarrow G/B = \text{const}$;

— из точки G $\rightarrow R/B = \text{const}$;

— из точки B $\rightarrow R/G = \text{const}$.

Взяв систему $R-L, L, R-L$ и треугольник цветностей, в котором возможные отношения $(R-L)/(R-L+L+B-L)$ отложены по оси ординат, а $(B-L)/(R-L+L+B-L)$ — по оси абсцисс, тем же путем можно показать, что по линиям, расходящимся:

— из точки C_B, отношение $(R-L)/L = \text{const}$, и, следовательно, отношение $(E_R - E_Y)/E_Y$ тоже постоянно;

— из точки C_R, отношение $(B-L)/L = \text{const}$, и, соответственно, отношение $(E_B - E_Y)/E_Y$ также постоянно;

— из точки S_C — постоянно отношение $(R-L)/(B-L)$, следовательно $(E_R - E_Y)/(E_B - E_Y) = \text{const}$.

Особо отметим, что свойства линий, проходящих через точки цветностей смесевых стимулов, фундаментальны и позиции этих линий нельзя линейно преобразовать в соответствующие позиции другого треугольника цветностей.

Итак, каждой линии веера рис. 22.1 можно назначить значение, выраженное через $(E_R - E_Y)/E_Y$ или $(E_B - E_Y)/E_Y$. Мы видим, при этом, что линиям, проходящим через

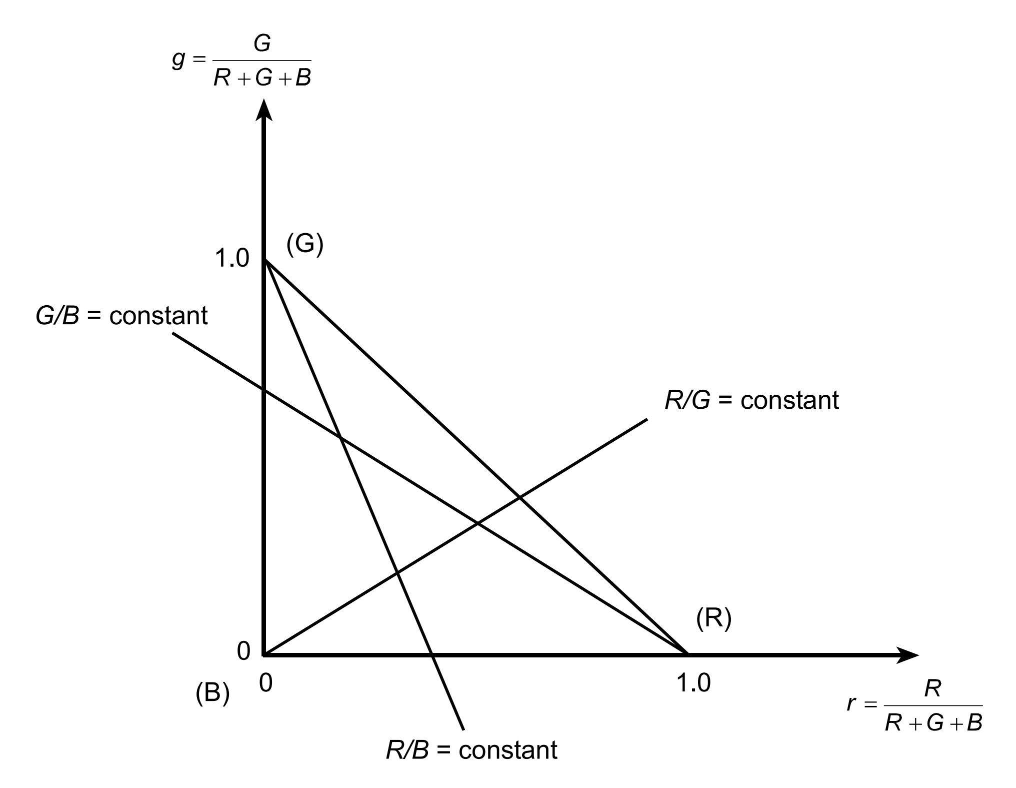


Рис. 22.2 Свойства прямых линий, проходящих через точки, представляющие цветности воспроизводящих (кардинальных) RGB-стимулов.

позицию S_C, соответствует нулевое значение (что и требуется). Прочие линии можно рассчитать, вычислив позиции точек на отрезке RG при разных значениях $(E_R - E_Y)/E_Y$ и позиции на отрезке GB при разных значениях $(E_B - E_Y)/E_Y$. На отрезке RG сигнал $E_B = 0$ и, следовательно, исходя из того, что $E_Y = 0.299E_R + 0.587E_G + 0.114E_B$, получим:

$$\frac{E_G}{E_R} = 1.704 \Bigg/ \left(\frac{E_R - E_Y}{E_Y} + 1\right) - 0.509$$

22.5.2 Закон центра тяжести

Точки на линии, связующей позиции кардинальных стимулов R и G, будут делить эту линию согласно ранее упоминавшемуся закону центра тяжести (см. раздел 7.6), то есть в том же соотношении, что центр тяжести весов Rl/v'_R и Gm/v'_G, где v'_R и v'_G — это v'-координаты цветностей соответственно R- и G- кардинальных стимулов. Поскольку $R = kE_R$ и $G = kE_G$ тот же результат получаем с $E_R l/v'_R$ и $E_G m/v'_G$. Весовое отношение в этом случае сокращается до:

$$\frac{v'_R m E_G}{v'_G l E_R} = \frac{0.528}{0.576} \times \frac{0.587}{0.299} \times \frac{E_G}{E_R} = 1.80\frac{E_G}{E_R}$$

Если l_{GB} длина линии, соединяющей точки G и B, то удаление от B будет соответствовать различным смесям E_R и E_G, то есть:

$$\frac{1.75E_G / E_B}{1+1.75E_G / E_B} \times l_{GB}$$

Следовательно, можно определить позиции, соответствующие $(E_B - E_Y)/E_Y$.

22.6 ВЛИЯНИЕ ГАММА-КОРРЕКЦИИ НА $E_R - E_Y$ И $E_B - E_Y$

Мы помним, что сигналы, передаваемые в реальных цветных телевизионных системах подвергаются предварительному гамма-предыскажению (см. раздел 19.13), и интересно отследить то, как это предыскажение влияет на взаимоотношения между величиной хроматического сигнала и цветностью воспроизводимого стимула.

Как было показано в разделе 19.13, типичное для телевизионного просмотра тусклое окружение, требует того, чтобы результирующая гамма телесистемы была равной 1.25 (а не 1.0). Коль скоро гамма (коэффициент контрастности) цветных телеприемников обычно равна 2.8, общей практикой является передача телесигналов с гаммой предыскажения равной 2.8/1.25, то есть 2.2. Результирующим эффектом такого подхода является рост колориметрической чистоты воспроизводимых стимулов (см. рис. 19.11). Вместе с тем, в дальнейшем, тусклое просмотровое окружение может понизить визуальную чистоту цвета этих стимулов.

Вместе с тем, иногда имеет смысл пересчитать величины хроматических сигналов таким образом, чтобы при той же величине гамма-предыскажения (2.2) общая гамма системы оказалась равной 1.0: такое может понадобиться тогда, кода фотометрическая яркость просмотрового окружения равна средней фотометрической яркости изображения.

22.6.1 Локусы цветностей при постоянных $(E'_R - E'_Y)/E'_Y$ и $(E'_B - E'_Y)/E'_Y$

Сетка линий рис. 22.3 демонстрирует цветности стимулов, воспроизводимых приемником с гамма-компенсацией сигнала 2.2 при различных величинах $(E'_R - E'_Y)/E'_Y$ и $(E'_B - E'_Y)/E'_Y$, где:

$$E'_R = E_R^{1/2.2}$$
$$E'_G = E_G^{1/2.2}$$
$$E'_B = E_B^{1/2.2}$$
$$E'_Y = 0.299E'_R + 0.587E'_G + 0.114E'_B$$

Подчеркнем, что построение такой сетки оправданно только в том случае, когда каждой паре величин $(E'_R - E'_Y)/E'_Y$ и $(E'_B - E'_Y)/E'_Y$ соответствует уникальная цветность воспроизводимого стимула.

Заметим, что линии, образующие сетку на рис. 22.3, почти не искривлены в непосредственной близости от точки S_C и весьма сильно изгибаются — вдали от нее, то есть: сетки рис. 22.1 и 22.3 — не одно и то же. Однако отличия между этими сетками не есть проявление погрешностей в цветовоспроизведении, но лишь указание на то, что гамма-коррекция влияет на взаимоотношения между электрическим сигналом и сиг-

налом оптическим[1]. И стоит отметить при этом, что телеприемниками с гамма 2.2 большинство стимулов воспроизводятся без каких-либо искажений.

Если из-за ограничений по полосе пропускания передаваемый паттерн дает слишком маленькую девиацию $E'_R - E'_Y$, то визуализация пойдет по среднему значению $E'_R - E'_Y$. При этом если разброс по $E'_B - E'_Y$ достаточен, то цветность воспроизводимых стимулов будет меняться вдоль одной из пунктирных линий рис. 22.3 (или аналогичной параллельной линии). Последнее обычно накладывается на колебания фотометрической яркости, вызванной колебаниями E'_Y-сигнала (при условии, что сие не указывает на необходимость отрицательного количества зеленого кардинала — см. раздел 19.7).

Аналогично, если передаваемый паттерн дает слишком маленькую девиацию $E'_B - E'_Y$, то визуализация пойдет по среднему значению $E'_B - E'_Y$. При этом если разброс по $E'_R - E'_Y$ достаточен, то цветность воспроизводимых стимулов будет меняться вдоль одной из сплошных линий рис. 22.3 (или аналогичных параллельных линий). При этом колебания фотометрической яркости вновь целиком будут зависеть от колебаний сигнала E'_Y.

Отметим, что приведенные выше аргументы относятся к отличиям по цветности в горизонтальном направлении изображения (т.е. вдоль строк дисплея); манипулирование цветностями по вертикальному направлению изображения определяемо строчной структурой этого изображения.

22.7 ВЛИЯНИЕ ГАММА-КОРРЕКЦИИ НА E_Y

На рис. 22.4 влияние гамма-коррекции на величины E'_Y-сигнала продемонстрировано путем вычерчивания на $u'v'$-диаграмме контуров $(E'_Y)^{2.2}/E_Y$ при уровнях светлоты 0.9, 0.8 и 0.7.

В результате применения гамма-предыскаженного E'_Y-сигнала вместо истинного сигнала E_Y возникают три эффекта, описанные в разделе 19.13:

— во-первых, нарушается принцип постоянства фотометрической яркости, вследствие чего последняя у мелких деталей изображения оказывается слишком низкой (в результате на величину фотометрической яркости сильно влияет шум хроматического сигнала);

— во-вторых, монохромными дисплеями высокохроматичные объекты сцены компонентом тоже воспроизводятся слишком темными;

— в-третьих, снижается деталировка в малых, но высокохроматичных областях изображений, поскольку яркостная информация идет по редуцированной полосе хроматических сигналов.

Из рис. 22.4 ясно, однако, что хотя величины $(E'_Y)^{2.2}/E_Y$ в углах RGB-треугольника всего лишь 0.24 по R, 0.53 по G и 0.074 по B, очевидно, что по большей части этого треугольника соотношение не опускается ниже 0.80. Поскольку дальние углы и края треугольника представляют цветности стимулов, редко встречающихся в обычных сценах, паразитные эффекты от передачи E'_Y-сигнала (вместо нативного линейного сигнала E_Y) в реальной практике крайне невелики. Однако, коль скоро гамма фактических телеприемников составляет порядка 2.8 (а не 2.2), то нежелательный эффект все же чуть больше, чем следует из рис. 22.4.

---

[1] В данном случае под оптическим сигналом подразумевается фотометрическая яркость кардинальных (воспроизводящих) RGB-стимулов. — *Прим. пер.*

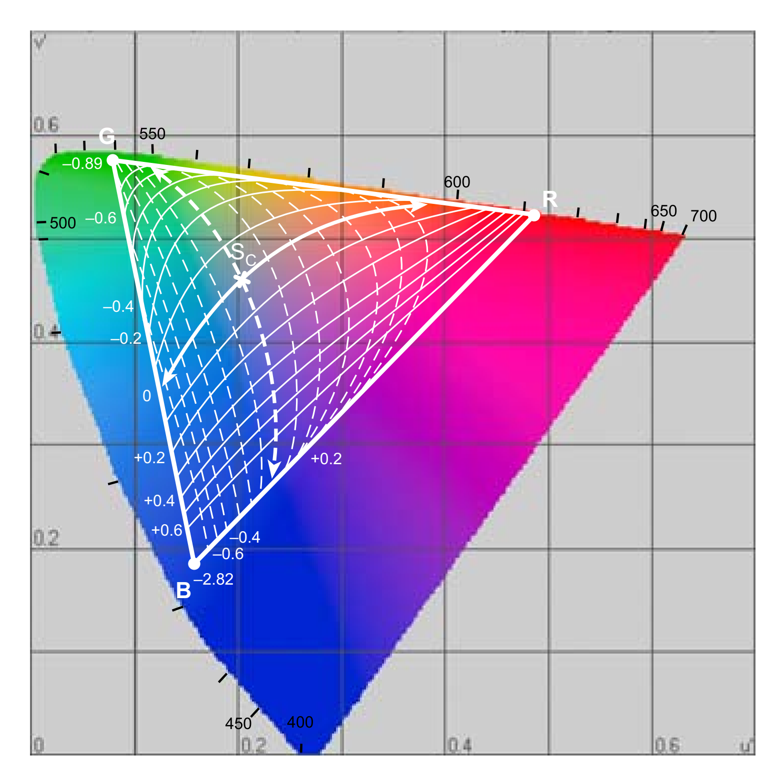


Рис. 22.3 Влияние гамма-коррекции трихроматических RGB-сигналов телекамеры на цветоразностные сигналы и, соответственно, на цветность воспроизводимых стимулов. Показаны линии постоянных $(E'_R - E'_Y)/E'_Y$ и $(E'_B - E'_Y)/E'_Y$, где $E'_R = E_R^{1/2.2}$, $E'_G = E_G^{1/2.2}$, $E'_B = E_B^{1/2.2}$ и $E'_Y = 0.299E'_R + 0.587E'_G + 0.114E'_B$, а также при условии, что величина гамма-компенсации при телепоказе равна 2.2.

22.8 СИСТЕМЫ «PAL» И «SECAM»

Прежде чем приступить к подробному разбору NTSC-системы, мы рассмотрим ее производные: системы PAL и SECAM. Дело в том, что NTSC, хоть и является их исторической предшественницей, задействует дополнительные операции кодирования сигналов.

PAL- и SECAM-версии NTSC-системы передают сигналы E'_Y, $E'_R - E'_Y$ и $E'_B - E'_Y$ (Roizen и Lipkin, 1965): E'_Y-сигнал идет по полной полосе, а сигналы $E'_R - E'_Y$ и $E'_B - E'_Y$ — по четверти ширины полосы E'_Y-сигнала (см. рис. 19.2). К последним применяется метод перенасыщения несущей, в результате чего для идентификации телеприемником цветоразностных сигналов требуется ряд приемов.

22.8.1 SECAM-система

В SECAM-системе (Sequence and Memory) перенасыщение несущей реализуется за счет передачи $E'_R - E'_Y$ и $E'_B - E'_Y$ через строку в каждом полукадре совместно со специальным *сигналом опознавания*, в результате чего приемник «знает», какой из двух сигналов был пущен по каждой из строк.

22.8.1.1 Строчная задержка

Электронная схема, задерживающая сигнал на время развертки одной строки, именуется *схемой строчной задержки* и используется при генерации цветоразностного сигнала на предыдущей строке полукадра. Несмотря на то, что таким путем за раз передается только один из двух цветоразностных сигналов — формируется полноценное цветное изображение. При этом имеют место потери хроматической информации по вертикальному направлению, поскольку применение схемы строчной задержки ведет к усреднению данных в соседних парах строк. В результате вертикальное хроматическое разрешение становится равным половине вертикального яркостного разрешения по каждому полукадру и, соответственно, четверти вертикального разрешения полного изображения; однако сие не столь значимо, как потери разрешения по горизонтальному направлению и не столь заметно визуально.

Стоит сказать, что за счет чередования сигналов $E'_R - E'_Y$ и $E'_B - E'_Y$ вертикальное хроматическое разрешение неподвижных и медленно движущихся элементов изображения (т.е., в данном контексте рассуждений — паре полукадров) увеличивается.

22.8.1.2 Модуляция

Вместо популярной амплитудной модуляции SECAM-система использует частотную модуляцию $E'_R - E'_Y$- и $E'_B - E'_Y$-сигналов. При этом E'_Y-сигнал модулируется-таки амплитудно, и разница в способах модуляции помогает приемнику корректно отличать яркостный сигнал от цветоразностных.

Отметим также, что поднесущая $E'_R - E'_Y$-сигнала на 4.40625 МГц выше, чем несущая сигнала яркостного, а поднесущая сигнала $E'_B - E'_Y$ выше яркостной несущей на 4.250 МГц (см. рис. 22.12(c)).

22.8.1.3 Область распространения

SECAM-система принята во Франции (где широковещательное цветное телевидение начало работу в 1967 г.), в России и ряде других стран (см. табл. 22.5 в конце данной главы).

22.8.2 PAL-система

PAL-система (Phase Alternation Line) одновременно передает гамма-предыскаженные амплитудно-модулированные сигналы $E'_R - E'_Y$ и $E'_B - E'_Y$ на одной несущей, но со сдвигом на четверть фазы между этими сигналами. То есть, приемником сигналы распознаются именно за счет сдвига фаз.

Сигнал т.н. *опорной фазы*, именуемый *сигналом цветосинхронизации,* несет в себе короткую импульсную *метку синхронизации* на поднесущей цветоразностных сигналов. Однако, коль скоро один из цветоразностных сигналов, скажем $E'_R - E'_Y$, сдвинут на полфазы между последовательными строками полукадра, сигналы, передаваемые на двух последовательных строках, выглядят так:

$$\begin{array}{lll} \text{Строка 1} & E'_R - E'_Y & E'_B - E'_Y \\ \text{Строка 3} & -(E'_R - E'_Y) & E'_B - E'_Y \end{array}$$

Сигналы по первой строке проходят затем через схему строчной задержки, в результате чего можно усреднить информацию по двум строкам. Коль скоро

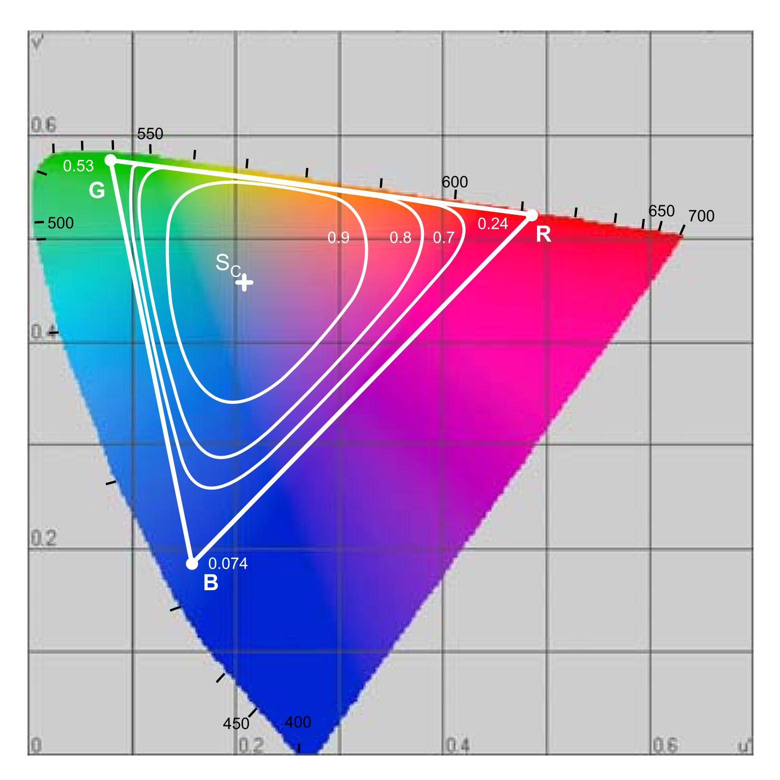


Рис. 22.4 Девиация цветностей воспроизводимых стимулов внутри RGB-треугольника при колебании соотношения $(E'_Y)^{2.2} / E_Y$. Несмотря на то, что возле точки цветности кардинального B-стимула отношение это падает ниже 0.1, по большей части поверхности треугольника оно выше 0.8.

$E'_R - E'_Y$-сигналы в двух строках сдвинуты на полфазы, они гасят друг друга и, следовательно, $E'_B - E'_Y$ получается сам собой:

$$\tfrac{1}{2}(E'_R - E'_Y) + \tfrac{1}{2}(E'_B - E'_Y) - \tfrac{1}{2}(E'_R - E'_Y) + \tfrac{1}{2}(E'_B - E'_Y) = E'_B - E'_Y$$

Передавая сигналы по третьей строке через схему, сдвигающую их на полфазы, и взяв затем другое среднее с задержанным сигналом по строке 1, сигналы $E'_R - E'_Y$ восстанавливаются:

$$\tfrac{1}{2}(E'_R - E'_Y) + \tfrac{1}{2}(E'_B - E'_Y) + \tfrac{1}{2}(E'_R - E'_Y) - \tfrac{1}{2}(E'_B - E'_Y) = E'_R - E'_Y$$

Поскольку усреднение касается последовательных строк полукадров, в каждом полукадре вертикальное хроматическое разрешение равно половине вертикального яркостного разрешения, и его четверти в каждом полном изображении (что эквивалентно горизонтальному хроматическому разрешению).

Также как и SECAM, PAL-системе для эффективной передачи требуется отдельный сигнал, позволяющий приемнику распознавать то, какой из двух типов сигналов передан по каждой строке; в данном случае маркирующим отличием между цветоразностными сигналами является противоположность их фаз, что и представляет собой собственно цветосинхронизирующий сигнал, обеспечивающий соответствующую идентификацию по каждой строке. Строки с противофазами перемежаются в последо-

вательных изображениях (парах полукадров), так что также как и в SECAM-системе только каждые четвертые полукадры идентичны по данному критерию.

Особенность PAL-системы состоит в том, что когда имеет место легкое нарушение фазовых отношений между эталонным сигналом и цветоразностными сигналами (при том факте, что фазы противоположны через строку, это нарушение почти полностью компенсируется), то есть система является весьма малочувствительной к легким фазовым сдвигам (в частности тем, что могут возникнуть при передаче сигнала на большие расстояния).

Фазовые сдвиги преобразуются в небольшие погрешности по колориметрической чистоте воспроизводимых стимулов, причем практически при полном отсутствии недочетов по цветовому тону (при этом недостаток насыщенности можно компенсировать самим приемником, когда в том имеется необходимость) (Sproson, 1983).

22.8.2.1 Фазовая детекция

Важно отметить, что вполне возможно сконструировать телеприемник PAL-стандарта, в устройстве которого нет схемы строчной задержки. В этом случае приемник использует т.н. *фазочувствительный детектор*, раздельно демодулирующий цветоразностные сигналы по двум фазам, смещенным друг от друга на четверть цикла. Однако когда в приемнике нет схемы строчной задержки, возникают фазовые погрешности в детекции цветоразностных сигналов, и погрешности эти ведут к искажению цветового тона воспроизводимых стимулов. Вместе с тем, фазовые погрешности в смежных строках каждого полукадра взаимнопротивоположны и, следовательно, когда недочеты эти невелики, зрение легко усредняет реакцию на стимулы, цветовой тон которых сдвинут от нормального в противоположных направлениях (вследствие чего общий результат в целом удовлетворителен).

Если же фазовые погрешности достаточно велики и искажение цветового тона становится заметным, то изображение приобретает грубую строчную структуру, в которой строки резко отличаются друг от друга по цветовому тону. Такой эффект принято называть «ганноверским частоколом» (Hanover bars[1]), поскольку первый раз его обнаружили на экранах ганноверских телевизоров.

22.8.2.2 Перекрестные помехи

Частота поднесущей в PAL-системе в $283^3/_4$ раза выше частоты строк (см. рис. 22.12(b)). Использовать величину, *нечетнократную* половине частоты строк (скажем, $283^1/_2$) невозможно, поскольку обратные фазы $E'_R - E'_Y$-сигнала на чередующихся строках сдвигают его боковую полосу на половинное значение частоты строк. Таким образом когда при том, что сигнал $E'_B - E'_Y$, идущий по боковой полосе, перемежается с яркостным сигналом (как и требуется), выбрана величина $283^1/_2$, то сигнал $E'_R - E'_Y$, также идущий по боковой полосе, будет совпадать с ним, вызывая взаимные помехи. Однако выбрав величину, нечетнократную *четверти* частоты строк, скажем $283^3/_4$, сигналы $E'_R - E'_Y$ и $E'_B - E'_Y$ будут устойчиво отделяться от яркостного сигнала.

Разнос яркостного сигнала и сигналов цветоразностных можно усилить, используя т.н. *узкополосный режекторный фильтр*, удаляющий из яркостного сигнала те частоты, на которых цветоразностные сигналы имеют выраженную амплитуду. Возникаю-

1 Официальный перевод термина «Hanover bars» звучит как «паразитные горизонтальные окрашенные полосы на экране ТВ-приемника системы PAL». — *Прим. пер.*

щее при этом легкое падение разрешения весьма мало́ в сравнении с ростом качества изоляции цветоразностных сигналов, и, соответственно, качества их детекции (со всеми вытекающими из этого результатами).

22.8.2.3 Область распространения

PAL-систему, разработанную Вальтером Брюхом (Townsend, 1978), приняли в Великобритании и Германии, где широковещательное телевидение начало работу в 1967 г (а также во многих других странах).

22.9 NTSC-СИСТЕМА

NTSC-система, также как и система PAL, использует метод перенасыщения несущей цветоразностных сигналов, передаваемых одновременно и смещенных на четверть фазы один относительно другого. Однако в отличие от SECAM- и PAL-систем, сигналы NTSC интерпретируются одинаково по каждой строке. Сигнал цветосинхронизации задает т.н. *эталонную фазу*, а приемник с фазочувствительным детектором восстанавливает цветоразностные сигналы на основании различия их фаз. Отметим, что NTSC-системе требуется более высокий уровень точности фазовой идентификации, чем системе PAL, поскольку рассогласование по фазе в данном случае ничем не компенсируется, а именно: фаза сигналов в NTSC-системе должна держаться в коридоре ±5°, тогда как в системе PAL — ±25°.

Эффективному разделению цветоразностных сигналов содействует то, что каждый передается на «своей» боковой полосе; однако, чтобы обе боковых полосы занимали лишь четверть ширины полосы яркостного сигнала, необходимо, чтобы частота поднесущих была ощутимо ближе к частоте несущей, чем того хотелось бы. В NTSC-системе данная проблема решается за счет передачи цветоразностных сигналов при полосах разной ширины: один сигнал занимает четверть ширины полосы яркостного сигнала, а второй — лишь одну десятую. Цветоразностный сигнал высокого разрешения идет в этом случае по двум боковым полосам (то есть там, где работают оба сигнала), но только по одной боковой полосе оставшейся части частотного диапазона (см. рис. 22.12(a)). Такой прием позволяет вполне удовлетворительно отделить цветоразностные сигналы друг от друга, и поднесущая цветоразностного сигнала будет уверенно отделенной от несущей.

Чтобы передача одного из цветоразностных сигналов на полосе равной всего лишь одной десятой полосы пропускания яркостного сигнала была устойчивой, NTSC-система использует не только перенасыщение полосы и перенасыщение несущей, но также и метод редукции синего канала (см. разделы 19.6 и 22.10).

Наконец отметим, что NTSC-система была принята в качестве стандарта не только в США (1953 г.), но также в Японии и некоторых других странах (см. табл 22.5 в конце главы).

22.10 РЕДУКЦИЯ СИНЕГО КАНАЛА В NTSC-СИСТЕМЕ

Как уже отмечалось (см. раздел 19.6) зрение человека гораздо хуже различает мелкие синие детали изображения, нежели красные или зеленые. К примеру, паттернам мелких синих и желтых стимулов одинаковых фотометрических яркостей свойственен *перцепционный «конфликт»*, в результате которого визуальные отличия между

этими стимулами исчезают. Сей феномен именуется *физиологической фовеальной тританопией* (или *физиологической синей слепотой*), объясняемой полным отсутствием β-колбочек в центральной ямке сетчатки (Willmer, 1944; Willmer и Wright, 1945; Thomson и Wright, 1947; Wright, 1952). Следовательно, имеет смысл передавать $E'_B - E'_Y$-сигнал на меньшей полосе, нежели сигнал $E'_R - E'_Y$.

На рис. 22.5 показаны линии, соединяющие точки, представляющие цветности стимулов одинаковой фотометрической яркости, которые чаще всего (и легче всего) при малых пространственных размерах воспринимаются искаженно (Thomson и Wright, 1953). Сравнив линии рис. 22.3 и рис. 22.5, легко убедиться в том, что направление линий последнего в целом повторяет результат колебания величины одного лишь $E'_B - E'_Y$-сигнала (и что лишний раз указывает на возможность сокращения только его полосы).

Однако, в NTSC-системе редукция полосы синего канала выполняется несколько иначе: когда в изображении появляется большое количество мелких деталей, то есть когда работает только один цветоразностный сигнал, диапазон воспроизводимых стимулов отклоняется от параллели красно-зеленому направлению (колебание $E'_R - E'_Y$-сигнала), и становится параллельным приблизительно оранжево/сине-зеленому направлению. Приоритетность такой методики была выявлена в серии практических тестов, в частности, Мидлетон и Холмс (Middleton and Holmes), экспериментируя с кусочками окрашенных бумаг весьма малого углового размера, обнаружили, что в этом случае диапазон цветоразличения падает до оранжево/сине-зеленых отличий (Middleton и Holmes, 1949; Hacking, 1957) (см. рис. 22.6).

Для понимания того, как физиологическая фовеальная тританопия эксплуатируется NTSC-системой рассмотрим диаграмму, на которой результат колебания $E_R - E_Y$-сигнала дан как функция от колебания сигнала $E_B - E_Y$(рис. 22.7). При этом сразу отметим, что эффекты гамма-коррекции будут обсуждаться позднее.

На данной диаграмме точка начала координат представляет стимулы с цветностью Стандартного С-осветителя, какой бы при этом ни была их фотометрическая яркость, то есть: координаты цветности черных, серых и белых стимулов одни и те же. Удаление точки «P» от нулевой отметки — суть функция от колориметрической чистоты интересующего стимула, умноженной на его фотометрическую яркость.

Траектория, по которой позиции стимулов распределяются на данной диаграмме, можно отследить, рассмотрев те случаи, при которых E_R, E_G и E_B меняются в диапазоне от 0 до 1 (см. табл. 22.1). Поскольку в NTSC-системе максимальное значение сигналов E_R, E_G и E_B телекамеры равно примерно 1В, позиции кардинальных стимулов будут соответствовать своим максимальной колориметрической чистоте и фотометрической яркости (разумеется, когда по осям диаграммы отложены величины сигналов телекамеры).

В NTSC-системе поднесущая амплитудно-модулирована двумя цветоразностными сигналами, сдвинутыми друг относительно друга на четверть фазы. Для любого цветового стимула общий результат двух отдельных модуляций можно рассматривать как единичную амплитудную модуляцию некоего сигнала по некоей специфической фазе. Амплитуда этого условного сигнала, в свою очередь, будет зависеть от фотометрической яркости и колориметрической чистоты воспроизводимого стимула, а фаза будет указывать на доминирующую длину волны. Таким образом, стимул «P» (рис. 22.7), при данной схеме перенасыщения несущей, будет передан с амплитудой, представленной отрезком «0P» и фазой, представленной углом ϕ.

Корреляция между доминирующей длиной волны стимула и фазой сигнала в NTSC

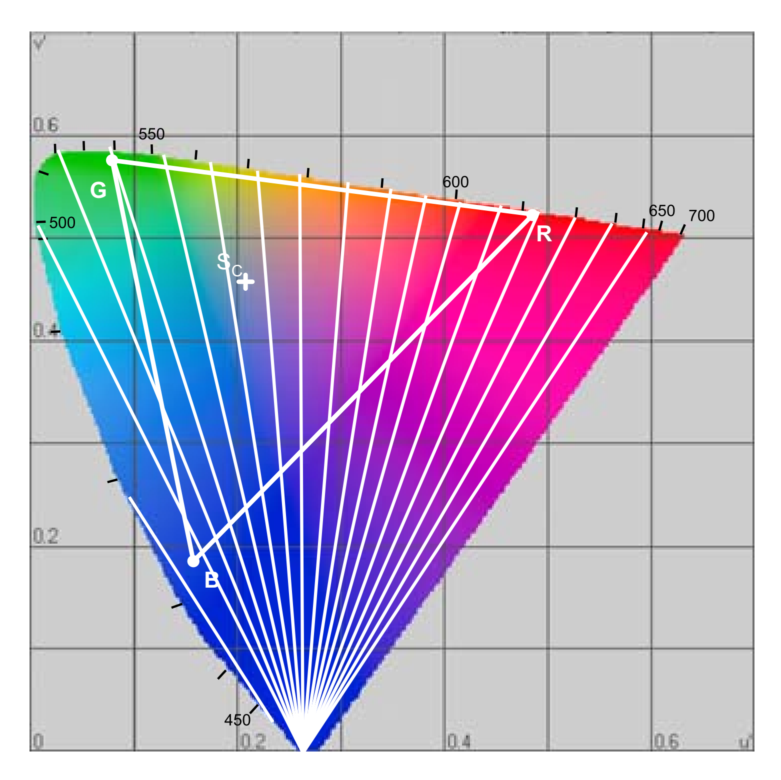


Рис. 22.5 Локусы хроматического «конфликта»: восприятие любой пары стимулов одинаковой фотометрической яркости, цветность которых лежит на на одной из линий, при малых углах обзора будет «конфликтным» (Thomson и Wright, 1953).

используется для изменения направлений осей, представляющих цветоразностные сигналы. Однако, как будет показано позже, дабы уйти от перегрузки передатчика при трансляции цветоразностных сигналов с максимальной амплитудой, сигналы эти в начале редуцируются по амплитуде в 1.14 раза для $E_R - E_Y$ и 2.03 раза для $E_B - E_Y$. Следовательно, возникает необходимость в перерисовке данных рис. 22.7, и использовании при этом в качестве переменных $(E_R - E_Y)/1.14$ и $(E_B - E_Y)/2.03$ (рис. 22.8).

Два цветоразностных сигнала — E_I и E_Q — сдвигаются затем по фазе на 33° относительно $E_R - E_Y$- и $E_B - E_Y$-осей. Сигнал E_I при этом представляет собой т.н. *синфазную составляющую* поднесущей[1], в то время как сигнал E_Q — ее т.н. *квадратурную составляющую*, т.е. сдвинутую от E_I на четверть фазы. Таким образом, отношения между двумя обсуждавшимися наборами сигналов, описываются следующими уравнениями (уравнениями поворота координатных осей):

$$E_I = \frac{E_R - E_Y}{1.14}\cos 33° - \frac{E_B - E_Y}{2.03}\sin 33°,$$
$$E_Q = \frac{E_R - E_Y}{1.14}\sin 33° + \frac{E_B - E_Y}{2.03}\cos 33°$$

которые легко сокращаются до:

[1] То есть совпадающей с ней по фазе. — *Прим. пер.*



Рис. 22.6 Цветной NTSC-телепоказ: a — только яркостный сигнал; b — яркостный сигнал и NTSC-I-сигнал; c — яркостный сигнал и NTSC-Q-сигнал; d — полный NTSC-сигнал, состоящий из яркостного, I- и Q-сигналов. I-сигнал, отвечающий за воспроизведение стимулов, цветность которых меняется по оранжево/голубому направлению, занимает примерно четверть ширины полосы яркостного сигнала. Q-сигнал, отвечающий за воспроизведение стимулов, цветность которых меняется по желто-зелено/пурпурному направлению, занимает всего одну десятую ширины полосы яркостного сигнала (см. разделы 22.10 и 22.1).

$$E_I = 0.736(E_R - E_Y) - 0.268(E_B - E_Y)$$
$$E_Q = 0.478(E_R - E_Y) + 0.413(E_B - E_Y)$$

Новые цветоразностные сигналы (E_I и E_Q) используются в связке с прежним яркостным сигналом (E_Y) (см. рис. 22.6).

Величины E_I- и E_Q-сигналов для стимулов, рассматривавшихся ранее, даны в табл. 22.2.

Уравнения, описывающие отношения между E_I- и E_Q-сигналами и сигналами $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$ позволяют определить на диаграмме цветности позиции гипотетических стимулов C_Q и C_I, соответствующие сигналам E_Q и E_I. Таким образом, решив эти уравнения для $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$, мы получим:

$$E_R - E_Y = 0.956E_I + 0.621E_Q,$$
$$E_B - E_Y = -1.106E_I + 1.703E_Q$$

из чего следует, что:

$$E_R = 0.956E_I + 1.000E_Y + 0.621E_Q$$
$$E_B = -1.106E_I + 1.000E_Y + 1.703E_Q$$

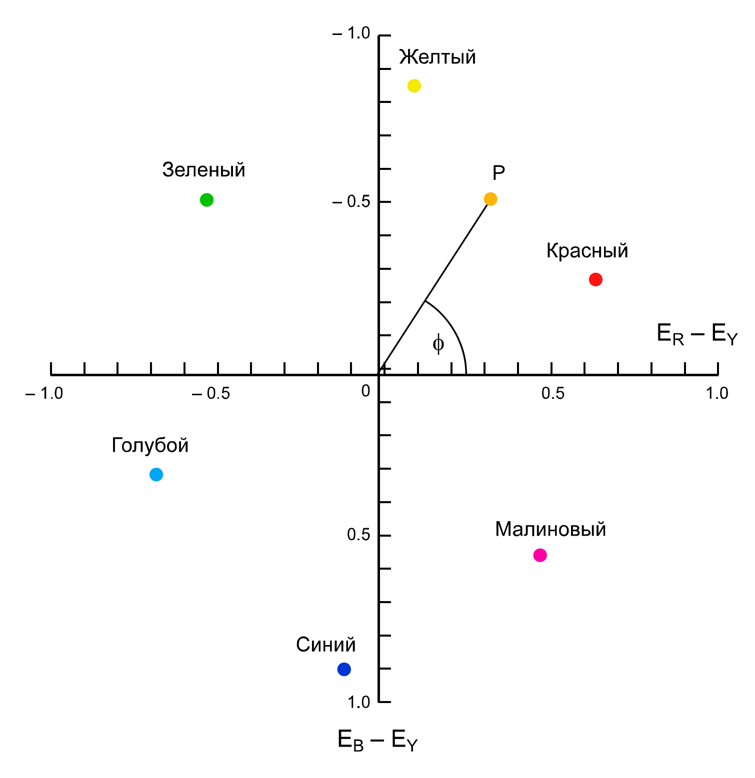


Рис. 22.7 Распределение позиций стимулов, E_R-, E_G- и E_B-сигналы которых равны нулю или единице в координатной системе с осями $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$. Длина такого отрезка как, к примеру, отрезок OP, зависит от колориметрической чистоты и фотометрической яркости стимула с позицией «P». Угол наклона отрезка OP к оси $E_R - E_Y$ (обозначен как ϕ) — есть функция от доминирующей длины волны стимула с позицией «P».

ТАБЛИЦА 22.1 Величины сигналов телекамеры по предметным стимулам максимально возможной колориметрической чистоты при максимальной фотометрической яркости

	Белый	Желтый	Голубой	Зеленый	Пурпурный	Красный	Синий	Черный
E_R	1	1	0	0	1	1	0	0
E_G	1	1	1	1	0	0	0	0
E_B	1	0	1	0	1	0	1	0
E_Y	1.000	0.886	0.701	0.587	0.413	0.299	0.114	0
$E_R - E_Y$	0	0.114	−0.701	−0.587	0.587	0.701	−0.114	0
$E_B - E_Y$	0	−0.886	0.299	−0.587	0.587	−0.299	0.886	0

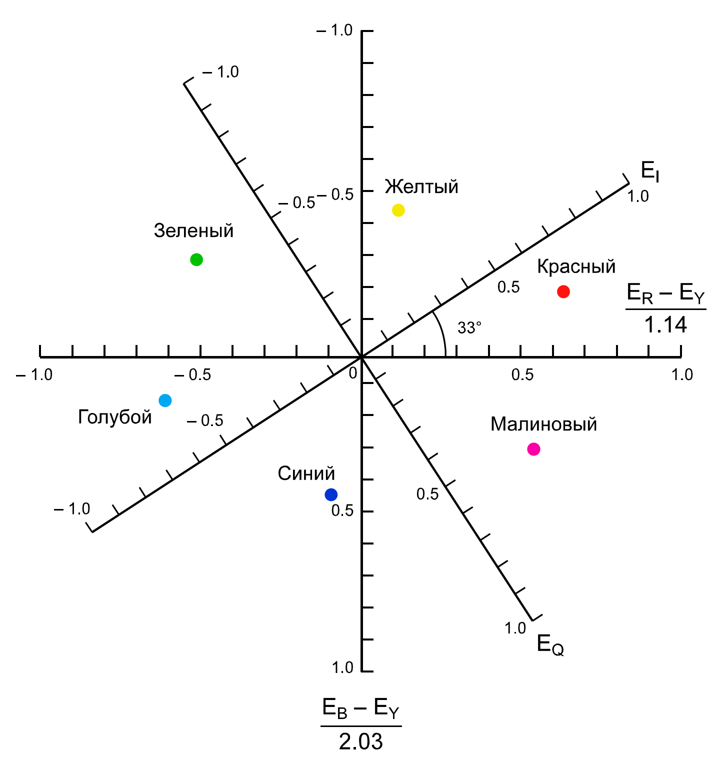


Рис. 22.8 Позиции тех же стимулов, что и на ри с. 22.7, но в системе координат $(E_R - E_Y)/1.14$ и $(E_B - E_Y)/2.03$. Относительно новых осей оси E_I и E_Q окажутся повернутыми на 33°.

ТАБЛИЦА 22.2 Величины E_I и E_Q по предметным стимулам максимально возможной колориметрической чистоты при максимальной фотометрической яркости

	Белый	Желтый	Голубой	Зеленый	Пурпурный	Красный	Синий	Черный
E_R	1	1	0	0	1	1	0	0
E_G	1	1	1	1	0	0	0	0
E_B	1	0	1	0	1	0	1	0
E_Y	1.000	0.886	0.701	0.587	0.413	0.299	0.114	0
E_I	0	0.321	−0.596	−0.275	0.275	0.596	−0.321	0
E_Q	0	−0.312	−0.212	−0.523	0.523	0.212	0.312	0

Используя $E_Y = 0.299E_R + 0.587E_G + 0.114E_B$, мы получим:

$$E_G = -0.272E_I + 1.000E_Y - 0.647E_Q$$

Коль скоро $I = kE_I$, $L = kE_Y$ и $Q = kE_Q$, где $k = \text{const}$ (см. раздел 22.5), то:

$$R = 0.956I + 1.000L + 0.621Q$$
$$G = -0.272I + 1.000L - 0.647Q$$
$$B = -1.106I + 1.000L + 1.703Q$$

Следовательно, соответствующие колориметрические уравнения будут выглядеть так:

$$1.0(\mathrm{C_I}) \equiv 0.956(\mathrm{R}) - 0.272(\mathrm{G}) - 1.106(\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{S_C}) \equiv 1.000(\mathrm{R}) + 1.000(\mathrm{G}) - 1.000(\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{C_Q}) \equiv 0.621(\mathrm{R}) - 0.647(\mathrm{G}) + 1.703(\mathrm{B})$$

Используя преобразование $(\mathrm{R})(\mathrm{G})(\mathrm{B}) \to (\mathrm{X})(\mathrm{Y})(\mathrm{Z})$ (из раздела 22.4), получим:

$$\begin{aligned} 1.0(\mathrm{C_I}) \;=\; & 0.956\big(0.607(\mathrm{X}) + 0.299(\mathrm{Y}) + 0.000(\mathrm{Z})\big) \\ & -0.272\big(0.174(\mathrm{X}) + 0.587(\mathrm{Y}) + 0.066(\mathrm{Z})\big) \\ & -1.106\big((0.200(\mathrm{X}) + 0.114(\mathrm{Y}) + 1.111(\mathrm{Z})\big) \end{aligned}$$

Вычислив аналогичным образом $1.0(\mathrm{S_C})$ и $1.0(\mathrm{C_Q})$ и упростив, получим:

$$1.0(\mathrm{C_I}) \equiv 0.312(\mathrm{X}) + 0.000(\mathrm{Y}) - 1.247(\mathrm{Z})$$
$$1.0(\mathrm{S_C}) \equiv 0.981(\mathrm{X}) + 1.000(\mathrm{Y}) + 1.177(\mathrm{Z})$$
$$1.0(\mathrm{C_Q}) \equiv 0.605(\mathrm{X}) + 0.000(\mathrm{Y}) + 1.849(\mathrm{Z})$$

Отметим, что в ряде случаев удобно переписать приведенные выше уравнения в следующий вид:

$$X = 0.312I + 0.981L + 0.605Q$$
$$Y = 1.000L$$
$$Z = -1.247I + 1.177L + 1.849Q$$

Понятно, что из приведенной выше системы уравнений для $(\mathrm{C_I})$, $(\mathrm{S_C})$ и $(\mathrm{C_Q})$ (XYZ-вариант) можно легко вычислить позиции этих стимулов на xy- и $u'v'$-диаграммах:

	x	y	v'	v'
$(\mathrm{C_I})$	–0.333	0	–0.365	0
$(\mathrm{S_C})$	0.310	0.316	0.201	0.461
$(\mathrm{C_Q})$	0.245	0	0.393	0

Позиции обсуждаемых стимулов на $u'v'$-диаграмме показаны на рис. 22.9: мы видим, что гипотетические стимулы C_I, и C_Q влияют только на фотометрическую яркость воспроизводимых стимулов, но не на их цветность, поскольку и у C_I, и у C_Q y-значения (и v'-значения) равны нулю. У линий, проходящих через C_I, постоянным является отношение Q/L и, следовательно, E_Q/E_Y; у линий, проходящих через C_Q — I/L, и, следовательно E_I/E_Y. Отметим, что по мере роста величины E_I/E_Y, цветность воспроизводимых стимулов отклоняется от цветности C_I, вместо того, чтобы стремиться к ней.

На рис. 22.9 также показан веер линий, расходящихся из C_I и C_Q: мы видим, что преобразование повернуло координатные оси так, как требуется, и колебания E_I теперь меняют цветность воспроизводимых стимулов в целом параллельно оранжево-красно/голубому направлению. То есть, очевидно, что редукция полосы была применена именно к E_Q-сигналу (передается на 1/3 ширины полосы), тогда как E_I-сигнал остался на частоте 1 МГц (как и положено 525-строчным системам).

Итак, снижать разрешение можно, но помня о том, что сужение полосы на каждые 0.3 МГц соответствует визуальному размытию изображения по каждой строке на 6 мм (при диагонали изображения 56 см).

Отметим также, что в некоторых областях применения NTSC полосу и E_I-сигнала сокращают до 1/3 МГц, что ведет к ощутимым потерям хроматического разрешения, но позволяет при этом радикально упростить конструкцию оборудования.

22.10.1 Некоторые алгебраические упрощения

Значения линий рис. 22.9 были выведены из уравнений для E_I и E_Q в показателях $E_R - E_Y$ и $E_B - E_Y$. Помня, что:

$$E_Y = 0.299E_R + 0.587E_G + 0.114E_B,$$

то когда $E_B = 0$:

$$\frac{E_G}{E_R} = \frac{1.253}{E_I/E_Y + 0.468} - 0.509$$

Следовательно, для получения величины удаления от точки цветности стимула R точек, лежащих на линии, соединяющей позиции кардинальных стимулов R и G, и соответствующих различным значениям E_I/E_Y, можно как и ранее воспользоваться выражением (см. раздел 22.5):

$$\frac{1.80E_G / E_R}{1 + 1.80E_G / E_R} \times l_{RG}$$

(Для удобства значения образовавшихся линий отмечены на отрезке RG).

Когда $E_R = 0$, то:

$$\frac{E_G}{E_B} = \frac{0.704}{E_Q/E_Y + 0.891} - 0.194,$$

и, следовательно, для получения величины удаления от точки цветности стимула B, точек на линии, соединяющей позиции кардинальных стимулов G и B, и соответствующих различным значениям E_Q/E_Y, можно воспользоваться выражением:

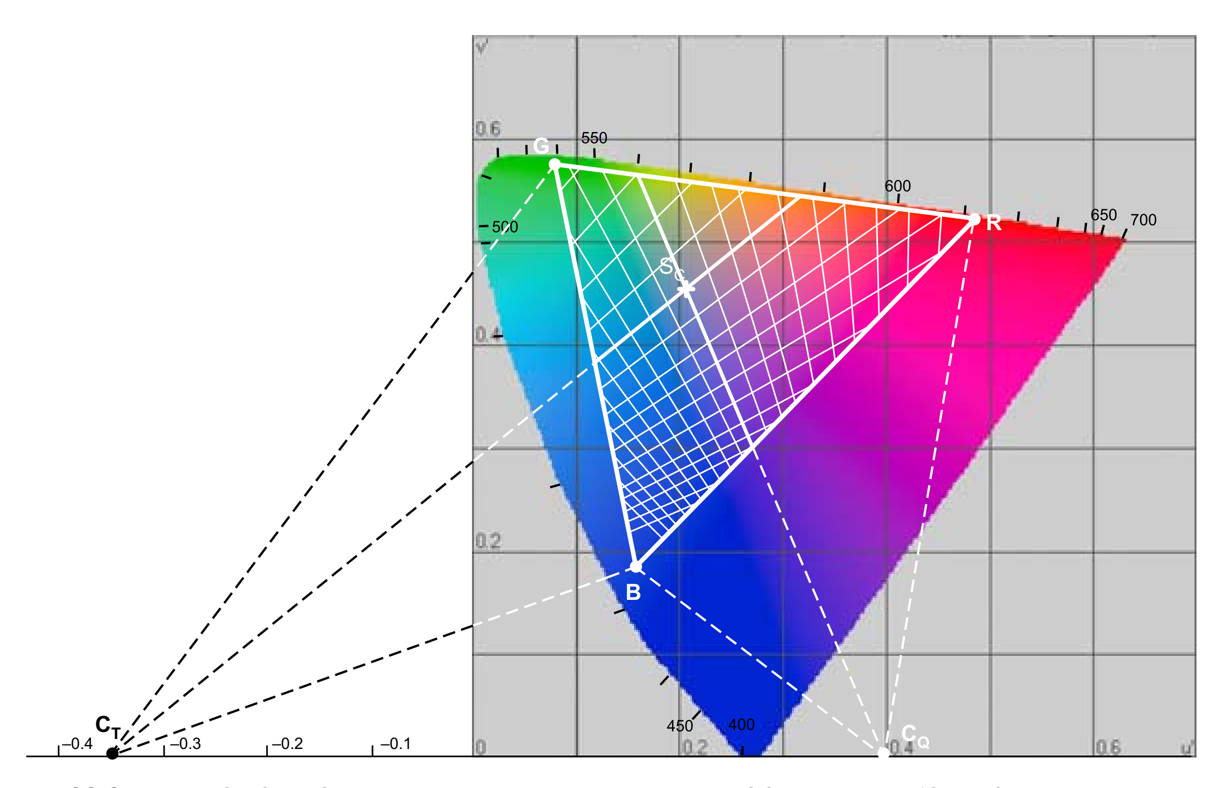


Рис. 22.9 Точки C_I, S_C и C_Q, представляющие позиции NTSC-стимулов (C_I, и C_Q — гипотетические), соответствующих переменным I, L и Q, где:

$$I = 0.736(R-L) - 0.268(B-L)$$
$$Q = 0.478(R-L) + 0.413(B-L)$$

Линия, идущая из точки C_Q соответствует постоянному отношению I/L; из точки C_I — постоянному отношению Q/L. Поскольку I, L и Q пропорциональны E_I, E_Y и E_Q, существуют линии постоянных E_I/E_Y и E_Q/E_Y (сетка линий на данном рисунке).

$$\frac{1.75E_G / E_B}{1+1.75E_G / E_B} \times l_{GB}$$

22.11 ГАММА-КОРРЕКЦИЯ В NTSC-СИСТЕМЕ

Теперь нам предстоит рассмотреть эффекты гамма-коррекции NTSC-сигналов. Без гамма-коррекции имеем:

$$E_I = 0.736(E_R - E_Y) - 0.268(E_B - E_Y)$$
$$E_Q = 0.478(E_R - E_Y) + 0.413(E_B - E_Y)$$

Но поскольку на практике гамма-коррекция в NTSC всегда имеет место, то передача сигналов идет так:

$$E'_I = 0.736(E_R^{1/\gamma} - E'_Y) - 0.268(E_B^{1/\gamma} - E'_Y),$$
$$E'_Q = 0.478(E_R^{1/\gamma} - E'_Y) + 0.413(E_B^{1/\gamma} - E'_Y)$$

где:

$$E'_I = 0.736(E_R^{1/\gamma} - E'_Y) - 0.268(E_B^{1/\gamma} - E'_Y)$$
$$E'_Q = 0.478(E_R^{1/\gamma} - E'_Y) + 0.413(E_B^{1/\gamma} - E'_Y)$$

Теперь изменения в цветности воспроизводимых стимулов (возникающие тогда, когда пространственная частота деталей так высока, что передается только цветоразностный сигнал) будут зависеть от колебаний E'_I-сигнала, но не сигнала E_I. Здесь весьма поучительно отследить то, как колебания сигналов E'_I и E'_Q будут влиять на цветность воспроизводимых стимулов. Нам это удастся, если, как и ранее, оба сигнала E'_I и E'_Q разделить на третий транслируемый сигнал: в данном случае — E'_Y, то есть:

$$\frac{E'_I}{E'_Y} = 0.736\left(\frac{E_R^{1/\gamma}}{E'_Y} - 1\right) - 0.268\left(\frac{E_B^{1/\gamma}}{E'_Y} - 1\right)$$
$$\frac{E'_Q}{E'_Y} = 0.478\left(\frac{E_R^{1/\gamma}}{E'_Y} - 1\right) + 0.413\left(\frac{E_B^{1/\gamma}}{E'_Y} - 1\right)$$

Точки на линиях, соответствующих E'_I/E'_Y = const и E'_Q/E'_Y = const, можно вычислить, подставляя различные значения E_R, E_G и E_B в вышеприведенные уравнения. Отложив на диаграмме соответствующие значения, получим требуемые контуры. Таковое представлено на рис. 22.10 при $\gamma = 2.2$ (значение, которое принято в качестве стандартного в NTSC): мы видим, что вокруг точки S_C сетка линий постоянных E'_I/E'_Y и E'_Q/E'_Y аналогична той, что построена для E_I/E_Y и E_Q/E_Y на рис. 22.9. Понятно, что если цветность интересующего стимула заметно отклоняется от цветности S_C, то возникают заметные численные отличия между величинами гамма-искаженных и гамма-неискаженных сигналов. Однако особо подчеркнем, что отличия эти имеют место только в самих сигналах: стимулы, воспроизводимые приемником, работающим с гамма 2.2, будут ровно такими же, что и те, которые были бы воспроизведены гипотетическим линейным приемником, использующим не предыскаженный (линейный) сигнал и работающим при единичной гамма (при этом, напомним, что реальные приемники работают при гамма 2.8±0.3 — см. раздел 19.13 и рис. 19.11).

В тех деталях изображения, которые настолько мелки, что E'_Q-сигнал не в состоянии нести полезную информацию, берется среднее значение этого сигнала по данной области изображения, и колебания цветности воспроизводимых стимулов в горизонтальном направлении изображения будут демонстрировать отличия только в направлении сплошной линии (рис. 22.9), соответствующей специфическому среднему значению E'_Q/E'_Y.

Аналогично, когда детали изображения столь мелки, что E'_I-сигнал оказывается не в состоянии нести полезную информацию, цветность воспроизводимых стимулов по горизонтальному направлению изображения будет соответствовать среднему значению E'_I- и E'_Q-сигналов по данной его области (на которое, кстати говоря, будет накладываться колебание E'_Y-сигнала, дающее отличия по фотометрической яркости у элементов этой области). Мы видим, что направления линий, соответствующих колебаниям величины отношения E'_I/E'_Y, по-прежнему в целом параллельны оранжево/голубому направлению, но искривляются в направлении красных (и заканчиваются на оранжевых) и в направлении синих (и заканчиваются на голубых) (см. рис. 22.6).

В вертикальном направлении, воспроизведение отличий по цветности будет зависеть, разумеется, от строчной структуры изображения.

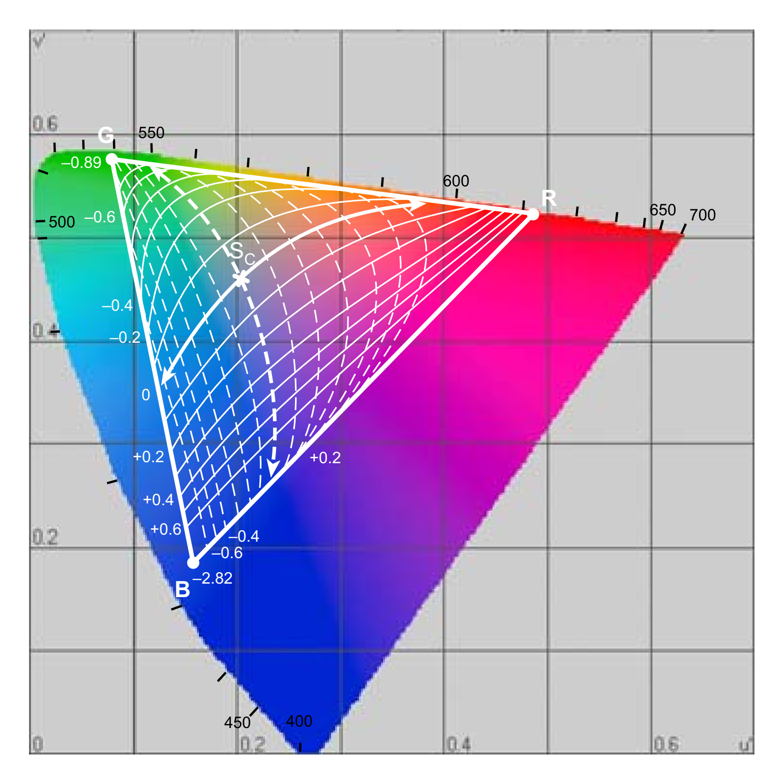


Рис. 22.10 Влияние гамма-коррекции трихроматических RGB-сигналов на цветоразностные сигналы I и Q, и, соответственно, на цветность воспроизводимых стимулов. Показаны линии постоянных E'_I / E'_Y и E'_Q / E'_Y при условии, что гамма телепоказа равна 2.2, где:

$$E'_I = 0.736(E_R^{1/2.2} - E'_Y) - 0.268(E_B^{1/2.2} - E'_Y)$$

$$E'_Q = 0.478(E_R^{1/2.2} - E'_Y) + 0.413(E_B^{1/2.2} - E'_Y)$$

$$E'_Y = 0.299E_R^{1/2.2} + 0.587E_G^{1/2.2} + 0.114E_B^{1/2.2}$$

Сплошные линии, представляющие E'_Q / E'_Y, демонстрируют направления изменения цветности тех стимулов, пространственный размер которых настолько мал, что передаются только E'_Y- и E'_I-сигналы.

22.12 МАКСИМАЛЬНАЯ АМПЛИТУДА СИГНАЛА

Как уже было показано ранее, во избежание избыточной нагрузки на передатчик перед формированием сигналов E_I и E_Q необходимо уменьшить величину сигнала $E_R - E_Y$ в 1.14 раза и сигнала $E_B - E_Y$ в 2.03 раза. В табл. 22.3 даны значения гамма-корректированных сигналов E'_Y, E'_I и E'_Q, которые фактически отвечают за воспроизведение кардинальных стимулов NTSC-системы, то есть стимулов, соответствующих нулевым или единичным величинам E_R, E_G и E_B. Поскольку 1.0 — это, как правило, максимальное значение этих сигналов, величины в табл. 22.3 демонстрируют передаваемый максимум. Нагрузка на передатчик, таким образом, — это функция от суммы амплитуд яркостного и цветоразностного сигналов. Следовательно, максимальные и минимальные значения, это:

$$E'_Y \pm \sqrt{\left[(E'_Y)^2 + (E'_Q)^2\right]}$$

ТАБЛИЦА 22.3 Величины гамма-корректированных сигналов по пространственно крупным стимулам максимально возможной колориметрической чистоты при максимальной фотометрической яркости

	Белый	Желтый	Голубой	Зеленый	Пурпурный	Красный	Синий	Черный
E_R	1	1	0	0	1	1	0	0
E_G	1	1	1	1	0	0	0	0
E_R	1	1	0	0	1	1	0	0
$E_R^{1/\gamma}$	1	1	1	1	0	0	0	0
$E_G^{1/\gamma}$	1	0	1	0	1	0	1	0
$E_B^{1/\gamma}$	1	0	1	0	1	0	1	0
E'_Y	1.000	0.886	0.701	0.587	0.413	0.299	0.114	0
$E_R^{1/\gamma} - E'_Y$	0	0.114	−0.701	−0.587	0.587	0.701	−0.114	0
$E_B^{1/\gamma} - E'_Y$	0	−0.886	0.299	−0.587	0.587	−0.299	0.886	0
$V = (E_R^{1/\gamma} - E'_Y)/1.14$	0	0.100	−0.615	−0.515	0.515	0.615	−0.100	0
$U = (E_B^{1/\gamma} - E'_Y)/2.03$	0	−0.436	0.147	−0.289	0.289	−0.147	0.436	0
$E'_Y + \sqrt{(V^2 + U^2)}$	1.000	1.333	1.333	1.178	1.004	0.931	0.561	0
$E'_Y - \sqrt{(V^2 + U^2)}$	1.000	0.439	0.069	−0.004	−0.178	−0.333	−0.333	0
E'_I	0	0.321	−0.596	−0.275	0.275	0.596	−0.321	0
E'_Q	0	−0.312	−0.212	−0.523	0.523	0.212	0.312	0
$\sqrt{[(E'_I)^2 + (E'_Q)^2]}$	0	0.447	0.632	0.591	0.591	0.632	0.447	0
$E'_Y + \sqrt{[(E'_I)^2 + (E'_Q)^2]}$	1.000	1.333	1.333	1.178	1.004	0.931	0.561	0
$E'_Y - \sqrt{[(E'_I)^2 + (E'_Q)^2]}$	1.000	0.439	0.069	−0.004	−0.178	−0.333	−0.333	0

Мы видим, что взвешивающие коэффициенты 1.14 и 2.03 ограничивают передаваемые сигналы диапазоном от −0.333 до +1.333. Строго говоря, для ухода от перегрузки трансмиттера, диапазон передаваемых сигналов должен лежать в рамках 0.0 – 1.0, но коль скоро бóльшие значения цветоразностного сигнала в обычных сценах возникают только на очень короткое время, допустимо легкое расширение диапазона. Отметим, что отрицательные значения амплитуды указывают лишь на то, что сигнал использует ту область амплитуд, которую обычно резервируют для сигналов синхронизации приемника.

Отметим также, что во избежание избыточной нагрузки на передатчик т.н. *приведенные* (сокращенные) *по амплитуде* сигналы $(E_R - E_Y)/1.14$ и $(E_B - E_Y)/2.03$ используются и в PAL-системе (эти сигналы иногда именуют как V- и U-сигналы соответственно, и их нельзя путать с $U'V'W'$-цветовыми координатами).

На рис. 22.11 в графическом виде дан комплект амплитуд из таблицы 22.3: вверху в виде набора вертикальных полос (именуемого *тестовым сигналом цветовых полос*), даны различные цветовые образцы. Колориметрия полосок тест-сигнала соответствует восьми стимулам, при которых величины E_R, E_G и E_B единичны или равны нулю, и, следовательно, соответствующие сигналы будут иметь значения из табл. 22.3.

В нижней части рисунка дан диапазон значений от $E'_Y + \sqrt{\left[(E'_Y)^2 + (E'_Q)^2\right]}$ до $E'_Y \pm \sqrt{\left[(E'_Y)^2 - (E'_Q)^2\right]}$ по каждому из стимулов.

В нижней части рисунка мы видим изменения амплитуды сигнала по мере развертки одной строки: ее значение в любой момент времени будет находиться где-то между максимумом и минимумом по каждому выбранному участку и согласно фазе цветоразностного сигнала. При этом, конечно, фазы, на которых возникает экстремум сигнала, разные по разным стимулам.

Если колебания амплитуды сигнала отследить с помощью осциллоскопа, синхронизированного по частоте строчной развертки, то картина на его экране будет примерно той, что показана на рис. 22.11: выделенная область будет восприниматься как область колебаний очень высокой частоты, наложенная на амплитуду яркостного сигнала. Если тест заменить на серую шкалу, у которой $E_R = E_G = E_B$, а величина E'_Y та же, что и у восьми тестовых хроматических стимулов, то осциллограмма будет выглядеть просто как жирная линия (рис. 22.11), представляющая амплитуду яркостного сигнала; при этом цветоразностный сигнал на всем протяжении графика будет равен нулю.

22.13 ПЕРЕКРЕСТНЫЕ ПОМЕХИ МЕЖДУ E'_I- И E'_Q-СИГНАЛАМИ

На рис. 22.12 и в табл. 22.4 показано точное распределение частот 525-строчной NTSC-системы, а также 625-строчных PAL- и SECAM-систем. Понятно, что стандартизация полос в 1 МГц (для E'_I) и 1/3 МГц (для E'_Q) несущей цветоразностных сигналов предполагает то, что верхняя боковая полоса E'_I-сигнала частично отсекается верхним пределом общей полосы. Следовательно E'_I-сигнал не занимает собой полностью двух боковых полос. Следствием сего являются т.н. *перекрестные помехи* (интерференция) между двумя сигналами. При этом, коль скоро E'_Q идет по двум боковым, то он не может интерферировать с E'_I; также, когда E'_I, передается по двойной боковой полосе, расширенной до полосы E'_Q, низкочастотные компоненты E'_I не интерферируют с E'_Q. Однако же отсечка свыше E'_Q ведет к возникновению упомянутых давеча перекрестных помех между E'_I и E'_Q. Вместе с тем, коль скоро частоты эти удалены из E'_Q-канала с помощью фильтра, пропускающего сигналы только тех частот, что лежат в рамках диапазона, отведенного для E'_Q, перекрестных помех между E'_I и E'_Q практически нет.

22.14 ЭФФЕКТЫ ПОДНЕСУЩЕЙ ЦВЕТОРАЗНОСТНЫХ СИГНАЛОВ

До передачи частота поднесущей цветоразностных сигналов подавлена и имеет место только на боковых частотах. Таким образом, когда нам необходимо передать и вос-

произвести некую серую область изображения, оба цветоразностных сигнала равны нулю и, следовательно, не оказывают влияния ни на цветное изображение, ни на черно-белое. Однако, когда речь идет о передаче информации о хроматических стимулах, но при этом их воспроизведении на монохромных приемниках, боковые частоты цветоразностных сигналов выглядят как модуляции яркости вдоль каждой из строк с промежутками эквивалентными частотам, лежащим возле частоты поднесущей. Эти модуляции инициируют появление паразитных пар точек, которые смещаются вдоль последовательных строк каждого полукадра на расстояние, равное половине (или четверти) этих пар. Поскольку общее число строк в каждом изображении нечетное, паттерн точек будет инвертным в парах последовательных полных изображений.

Стоит сказать, что благодаря определенной инертности зрительного восприятия визуальный эффект от паразитных точек не столь высок, но их присутствие, тем не менее, может искажать монохромные изображения, особенно если последние склонны «ползти» в горизонтальном или вертикальном направлениях.

Когда приемник воспроизводит хроматический (несерый) стимул, интенсивность каждого из трех электронных пучков такова, что упомянутые выше паразитные точки не воспроизводятся, поскольку поднесущая боковых частот демодулирована в узкополосные цветоразностные сигналы. Результатом сего является и то, что хроматическая поднесущая имеет меньшее т.н. *возмущающее действие* на цветной дисплей, нежели на монохромный.

22.15 СРАВНЕНИЕ NTSC-, PAL- И SECAM-СИСТЕМ

Все три описанных выше телевизионных системы (NTSC, PAL и SECAM) на практике продемонстрировали то, что способны давать вполне удовлетворительные и очень схожие между собой результаты; отличия между этими системами можно выявить только лишь при просмотре изображения с расстояния ощутимо меньшего, чем обычное расстояние телевизионного просмотра. Однако отличия эти все же имеют место и мы их опишем ниже.

22.15.1 PAL и SECAM

PAL- и SECAM-системы, задерживая хроматическую информацию по строкам развертки, снижают хроматическое разрешение в вертикальном направлении. Но поскольку передача информации о цветности стимулов в любом случае жестко ограничена по полосе пропускания, падение хроматического разрешения по вертикальному направлению не выше, чем по горизонтальному. Обычная чересстрочная развертка в последовательных полукадрах помогает равномерно усреднить хроматическую информацию в последовательных строках этих полукадров, и, за счет перемежения сигналов в любой данной строке в последовательных полных изображениях (парах полукадров), разрешение и плавность хроматических переходов в результирующем изображении улучшаются (за исключением быстро движущихся объектов).

22.15.2 NTSC и PAL

В NTSC- и PAL-системах при передаче высокодеталированных паттернов яркостный сигнал по мелким деталям изображения можно ошибочно истолковать как сигнал хроматический. Так, к примеру, черно-белые паттерны могут воспроизводиться с

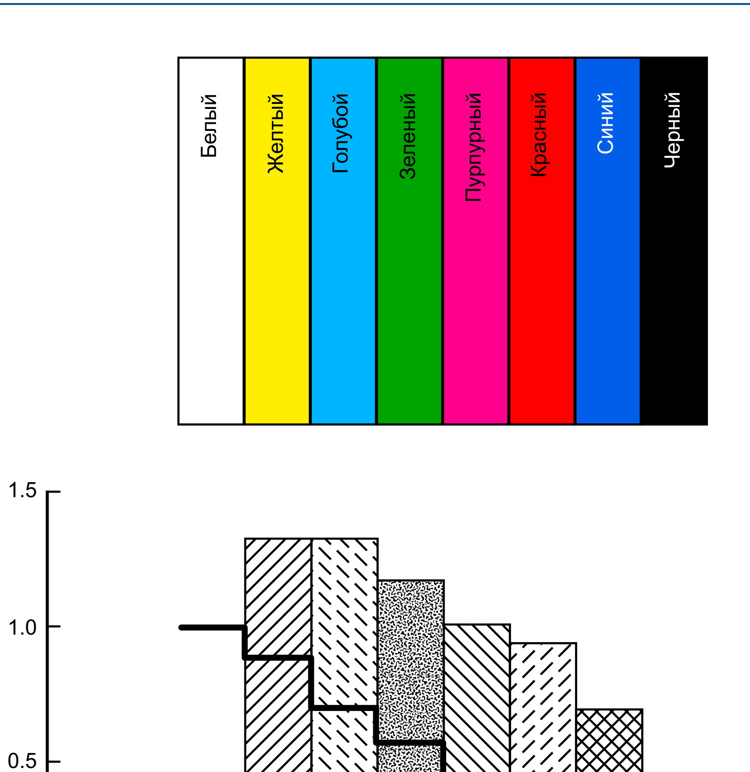


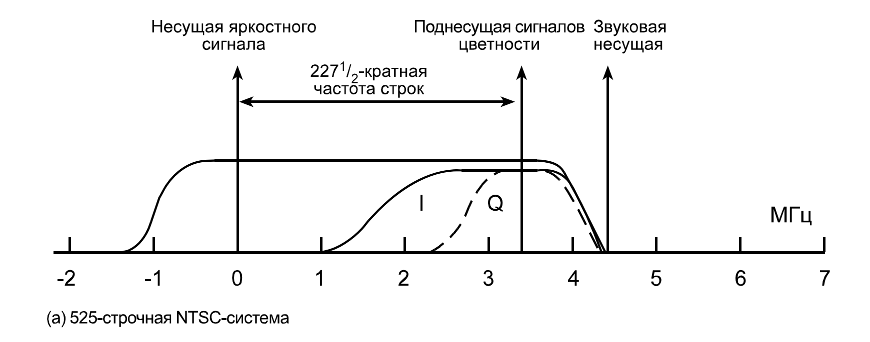
Рис. 22.11 В верхней части рисунка показан типичный тест-объект. В нижней части дан характер колебаний амплитуды передаваемого сигнала вдоль единичной строки. Жирная черная линия — амплитуда яркостного сигнала; прямоугольники с заливкой — диапазоны амплитуд объединенных яркостного и хроматических сигналов. Ось ординат NTSC-системы, но с тем же успехом она подходит и системе PAL.

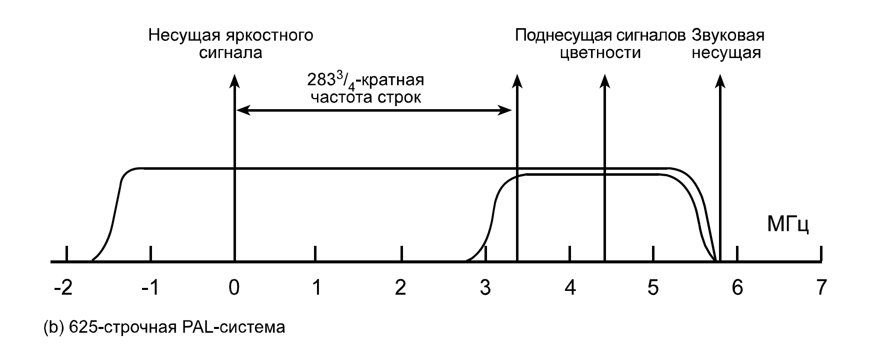
паразитными хроматическими контурами. SECAM-система лишена этого недостатка благодаря частотной модуляции хроматических сигналов.

PAL-систему можно модернизировать по данному параметру за счет применения т.н. *узкополосного режекторного фильтра*, который задерживает в основном яркостный сигнал на частотах, лежащих возле частот хроматической поднесущей. Паразитные краевые эффекты в данном случае возникают лишь при очень жесткой работе этого фильтра, поэтому наилучшего результата можно добиться на промежуточных ее уровнях.

22.15.3 Издержки всех трех систем

В любой из трех обсуждаемых систем на мелких паттернах могут возникнуть паразитные визуальные эффекты, проявляющие себя:





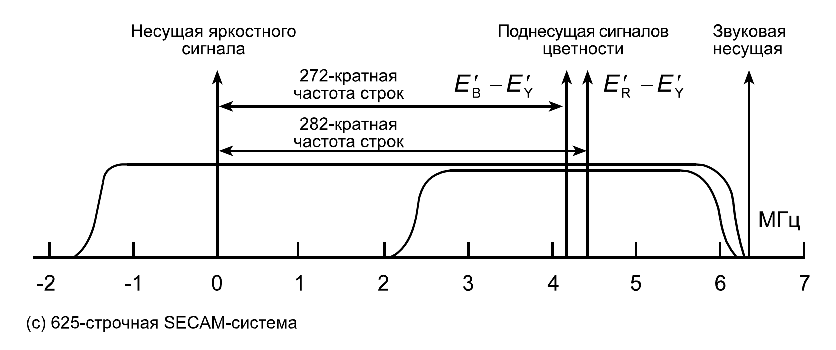


Рис. 22.12 Распределение частот: (a) — в 525-строчной системе NTSC; (b) — в 625-строчной PAL-системе; (c) — в 625-строчной системе SECAM.

— в NTSC-системе в виде «пилы», появляющейся только на монохромных дисплеях (цветные вообще не подвержены этому дефекту);

— на монохромных дисплеях PAL-системы в виде паразитных линий, повернутых на 30° от горизонтали (в гораздо меньшей степени на цветных);

— в SECAM-системе в виде «шеврона» («елочка»), появляющегося на экранах только монохромных приемников.

Высокое технологическое сходство между NTSC- и PAL-системами обеспечивает их высокую совместимость. SECAM-же стоит особняком. PAL-система, в которой сдвиг фаз выражен гораздо меньше, чем в NTSC, позволяет передавать сигнал на гораздо бóльшие расстояния по коаксиальным кабелям. При этом NTSC-систему можно использовать в локальном вещании без усложнения конструкции приемника схемой задержки.

ТАБЛИЦА 22.4 Частоты различных телевизионных систем

Система	NTSC	PAL	SECAM
Количество строк	525	625	625
Частота полных кадров/с	29.97	25	25
Примерная ширина полосы на полное изображение (МГц)	4	$5^1/_2$	6
Превышение частоты хроматической поднесущей над яркостной несущей (МГц)	3.579545	4.43361875	4.440625 4.250
Частота хроматической несущей как произведение на частоту строк	227.5	283.75	282 272
Тип модуляции хроматических сигналов	Амплитудная	Амплитудная	Частотная
Превышение частоты звуковой несущей над яркостной несущей (МГц)	4.5	6.0	6.5
Ширина полосы E'_I(на 3 дБ ниже максимума)	1.0	—	—
Ширина полосы E'_Q(на 3 дБ ниже максимума)	0.3	—	—
Ширина полосы $E'_R - E'_Y$(на 3 дБ ниже максимума)	—	1.3	1.5
Ширина полосы $E'_B - E'_Y$(на 3 дБ ниже максимума)	—	1.3	1.5
Превышение частоты несущей яркостного сигнала над минимальной шириной полосы	1.25	2	2
Примерная общая ширина полосы вещания (МГц)	6	8	8.5

Возможно, наиболее важным отличим SECAM-системы от двух других является то, что только в ней не возникает конфликта между яркостным сигналом и сигналами цветоразностными, но в целом, SECAM — это наиболее сложная система.

PAL благодаря автоматической фазовой коррекции устойчивей в отношении погрешностей по цветовому тону воспроизводимых стимулов, нежели система NTSC, в которой необходимость управления цветовым тоном на стадии приема требует достаточно высокой квалификации пользователей.

И последнее в этом разделе: PAL- и SECAM обычно используют 625-строчные телевизионные стандарты, в то время как NTSC обычно пользуется стандартами 525-строчными (в результате чего изображения, воспроизводимые последней, имеют меньшее разрешение и визуальную резкость). С другой стороны, поскольку в 525-строчных системах частота полукадров обычно равна 60 Гц мелькание оказывается не столь заметным как в 50-герцовых системах при 625-строках развертки.

22.16 НЕКОТОРЫЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ПОСТРОЕНИЯ

Если обратиться к рис. 22.13, то станет понятно, что стимул «M» (чья цветность лежит на линии, соединяющей позиции кардинальных стимулов G и B) можно уравнять подходящей смесью этих стимулов, и поэтому мы можем записать:

$$M(\mathrm{M}) \equiv G(\mathrm{G}) + B(\mathrm{B})$$

Аналогично стимул N, цветность которого лежит на линии, соединяющей позиции стимула M и кардинального стимула R, можно уравнять подходящей смесью последних:

$$N(\mathrm{N}) \equiv M(\mathrm{M}) + R(\mathrm{R})$$

Точная позиция точки, представляющей стимул N на линии, соединяющей позиции кардинального стимула R и стимула M, определяется законом центра тяжести и будет той же, что и у центра тяжести весов:

$\dfrac{mG+nB}{v'_{\mathrm{M}}}$, «давящего» на (M) и

$\dfrac{lR}{v'_{\mathrm{R}}}$, «давящего» на (R)

Сходный результат получим, используя веса:

$$\frac{mE_{\mathrm{G}}+nE_{\mathrm{B}}}{v'_{\mathrm{M}}} \text{ и } \frac{lE_{\mathrm{R}}}{v'_{\mathrm{R}}}$$

Однако $mE_{\mathrm{G}}+nE_{\mathrm{B}}=E_{\mathrm{Y}}-lE_{\mathrm{R}}$, следовательно:

$$\frac{E_{\mathrm{Y}}-lE_{\mathrm{R}}}{v'_{\mathrm{M}}} \text{ и } \frac{lE_{\mathrm{R}}}{v'_{\mathrm{R}}}$$

Если точки M и R лежат на линии постоянной v' (то есть, $v'_{\mathrm{M}}=v'_{\mathrm{R}}$), то отношения весов сводятся к:

$$E_{\mathrm{Y}}-lE_{\mathrm{R}} \text{ и } lE_{\mathrm{R}}$$

Расстояние от точки, представляющей цветность стимула N, до точки M можно вычислить из:

$$\frac{lE_{\mathrm{R}}}{(E_{\mathrm{Y}}-lE_{\mathrm{R}})+lE_{\mathrm{R}}}l_{\mathrm{RM}}=\frac{lE_{\mathrm{R}}}{E_{\mathrm{Y}}}l_{\mathrm{RM}}$$

где l_{RM} — это длина линии, соединяющей точки R и M.

Поскольку l и l_{RM} — константы, расстояние NM будет пропорционально $E_{\mathrm{R}}/E_{\mathrm{Y}}$, и, следовательно линия, соединяющая R и M, может образовать линейную шкалу $E_{\mathrm{R}}/E_{\mathrm{Y}}$. Последнюю легко конвертировать в линейную шкалу $(E_{\mathrm{R}}-E_{\mathrm{Y}})/E_{\mathrm{Y}}$, отняв 1.0 от каждого значения. Для удобства можно использовать любую линию, параллельную

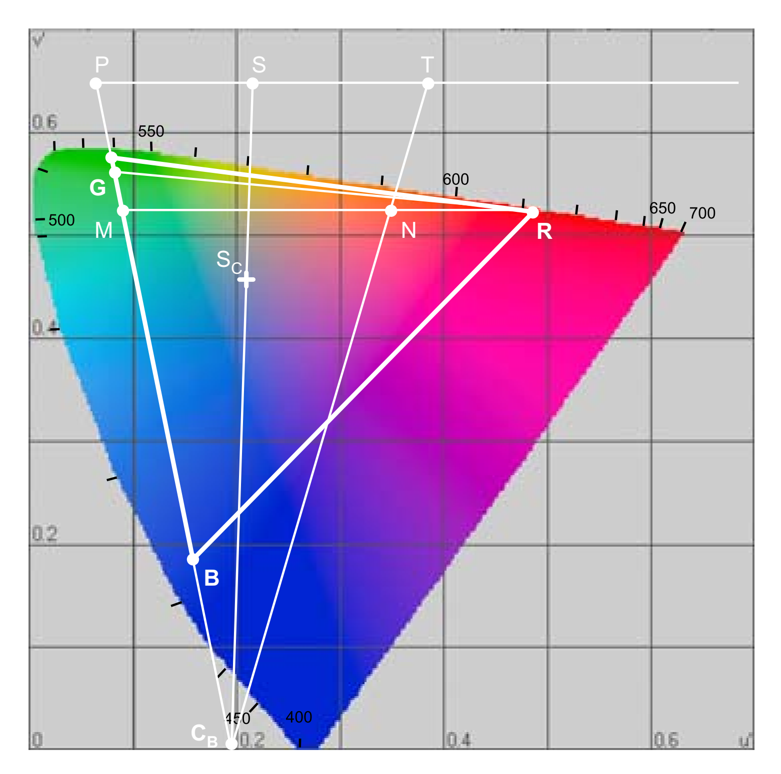


Рис. 22.13 Поскольку линия, соединяющая точки R и M — это линия постоянной величины v', смесь стимулов позиций R и M будет представлена точками с центрами тяжести весов прямо пропорциональными фотометрической яркости стимулов R и M. Следовательно, долю стимула R в смеси можно представить в виде равномерной шкалы на отрезке MR или на любой другой линии, параллельной отрезку MR, в частности линии PT. Таким образом, равномерную шкалу отрезка PT можно использовать для поиска величин R/L и, следовательно, $(R-L)/L$ для линий постоянного отношения R/L, идущих из C_B.

RM, в частности, такую как PT на рис. 22.13 (с точкой P, лежащей на отрезке BG). Если линия, идущая от C_B через S_C, пересекает ее в точке S, а позиция линии PT выбрана так, что PS = 1.0 на специальной шкале, то прочие значения найти будет очень легко.

Отметим, что приведенная схема потому дает корректные результаты, что в точке S_C сигнал $E_R = E_Y$, и, следовательно, линия, проходящая через S_C — это линия, для которой $E_R/E_Y = 1.0$ (следовательно $(E_R - E_Y)/E_Y = 0$), а линия, идущая от CB и проходящая через B и G — это линия, для которой $E_R = 0$, и, таким образом $E_R/E_Y = 0$ (следовательно, $(E_R - E_Y)/E_Y = -1.0$).

В принципе, сходное построение можно использовать для получения веера линий, исходящих из C_R. В этом случае расстояния будут равными:

$$n\frac{E_B}{E_Y}l_{BM},$$

где l_{BM} — это длина линии, идущей от точки B параллельно u'-оси, и которая пересекает линию GR в точке M. К сожалению, геометрия $u'v'$-диаграммы такова, что данный метод не практичен для шкалирования E_B/E_Y, но в отношении ряда других диаграмм цветности он вполне применим.

ТАБЛИЦА 22.5 Телевизионные стандарты разных стран

СТРАНА	СИСТЕМА	СТРАНА	СИСТЕМА
Австралия	PAL	Гайана	NTSC
Австрия	PAL	Гамбия	PAL
Азербайджан	PAL	Гана	PAL
Азорские острова	PAL	Гватемала	NTSC
Албания	PAL	Гвиана (французский язык)	SECAM
Алжир	PAL	Гвинея	PAL
Аляска (штат США)	NTSC	Гвинея—Бисау	PAL
Ангилья	—	Германия	PAL
Ангола	PAL	Гибралтар	PAL
Андорра	—	Гондурас	NTSC
Антарктида	NTSC	Гонконг	PAL
Антигуаи Барбуда	NTSC	Гренада	NTSC
Аргентина	PAL	Греция	PAL
Армения	SECAM	Грузия	SECAM
Аруба	NTSC	Гуам	NTSC
Атолл Мидуэй	—	Дания	PAL
Афганистан	PAL	Джибути	SECAM
Багамы	NTSC	Доминиканская республика	NTSC
Бангладеш	PAL	Египет	PAL
Барбадос	NTSC	Замбия	PAL
Бахрейн	PAL	Западная Сахара	—
Белиз	NTSC	Западный берег и Сектор Газа (Палестина)	PAL
Белоруссия	SECAM	Зеленый мыс	—
Бельгия	PAL	Зимбабве	PAL
Бенин	SECAM	Израиль	PAL
Бермуды	NTSC	Индия	PAL
Болгария	PAL	Индонезия	PAL
Боливия	NTSC	Иордания	PAL
Босния—Герцеговина	PAL	Ирак	SECAM
Ботсвана	PAL	Иран	SECAM
Бразилия	PAL	Ирландия	PAL
Британский Индийский океан	NTSC	Исландия	PAL
Бруней Даруссалам	PAL	Испания	PAL
Буркина-Фасо	SECAM	Италия	PAL
Бурунди	SECAM	Йемен	PAL и NTSC
Бутан	—	Казахстан	SECAM
Вануату	—	Камбоджа	PAL
Ватикан	—	Камерун	PAL
Великобритания	PAL	Канада	NTSC
Венгрия	PAL	Канарские острова	PAL
Венесуэла	NTSC	Катар	PAL
ВоллисиФутуна	SECAM	Кения	PAL
Восточный Тимор	PAL	Кипр	PAL
Вьетнам	NTSC и SECAM	Кирибати	PAL
Габон	SECAM	Китай	PAL
Гавайи (штат США)	NTSC	Кокосовые острова	—
Гаити	NTSC		

СТРАНА	СИСТЕМА	СТРАНА	СИСТЕМА
Колумбия	NTSC	Новая Каледония	SECAM
Коморские острова	—	Норвегия	PAL
Конго	SECAM	О. Галапагос	NTSC
Корея Северная	PAL и NTSC	О. Кайман	—
Корея Южная	NTSC	О. Кука	PAL
Коста-Рика	NTSC	О. Самоа	PAL
Кот-д'Ивуар	SECAM	О. Вознесения	—
Куба	NTSC	О. Гваделупа	SECAM
Кувейт	PAL	О. Гренландия	PAL
Кыргызстан	SECAM	О. Ниуэ	PAL
Лаос	PAL	О. Норфолк	PAL
Латвия	PAL	О. Пасхи	PAL
Лесото	PAL	О. Рождества	—
Либерия	PAL	Объединенные Арабские Эмираты	PAL
Ливан	SECAM	Оман	PAL
Ливия	PAL	Пакистан	PAL
Литва	PAL	Палау	NTSC
Лихтенштейн	—	Панама	NTSC
Люксембург	PAL и SECAM	Папуа — Новая Гвинея	PAL
Маврикий	SECAM	Параrвай	PAL
Мавритания	SECAM	Перу	NTSC
Мадагаскар	SECAM	Полинезия (французский язык)	SECAM
Мадейра	PAL	Польша	PAL
Майот	SECAM	Португалия	PAL
Макау	PAL	Пуэрто—Рико	NTSC
Македония	PAL	Россия	SECAM
Малави	PAL	Руанда	—
Малайзия	PAL	Румыния	PAL
Мали	SECAM	Сальвадор	NTSC
Мальдивы	PAL	Сан-Марино	PAL
Мальта	PAL	Саудовская Аравия	PAL и SECAM
Марокко	SECAM	О. св.Винсента	NTSC
Мартиника	SECAM	О. св.Елены	—
Маршалловы острова	NTSC	О. св. Киттси Невис	NTSC
Мексика	NTSC	О. св. Люция	NTSC
Микронезия	NTSC	О. св. ПирриМиквелон	SECAM
Мьянмар	—	Свазиленд	PAL
Мозамбик	PAL	Сейшельские острова	PAL
Молдова	SECAM	Сенегал	SECAM
Монако	PAL и SECAM	Сербия и Черногория	PAL
Монголия	SECAM	Сингапур	PAL
Монтсеррат	NTSC	Сиря	PAL
Намибия	PAL	Словакия	PAL и SECAM
Науру	PAL	Словения	PAL
Непал	PAL	Соединенные Штаты Америки	NTSC
Нигер	SECAM	Соломоновы острова	—
Нигерия	PAL	Сомали	PAL
Нидерланды	PAL	Судан	PAL
Никарагуа	NTSC		
Новая Зеландия	PAL		

СТРАНА	СИСТЕМА	СТРАНА	СИСТЕМА
Суринам	NTSC	Финляндия	PAL
Сьерра-Леоне	PAL	Фолклендские острова	PAL
Таджикистан	SECAM	Франция	SECAM
Таиланд	PAL	Хорватия	PAL
Тайвань	NTSC	Чад	SECAM
Танзания	PAL	Чешская республика	PAL
Того	SECAM	Чили	NTSC
Тонга	NTSC	Швейцария	PAL
Тринидади Тобаго	NTSC	Швеция	PAL
Тристандакунья	—	Шри-Ланка	PAL
Тувалу	—	Эквадор	NTSC
Тунис	SECAM	Экваториальная Гвинея	SECAM
Туркии Кайкос	—	Эритрея	—
Туркмения	SECAM	Эстония	PAL
Турция	PAL	Эфиопия	PAL
Уганда	PAL	ЮжнаяАфрика	PAL
Узбекистан	SECAM	Ямайка	NTSC
Украина	SECAM	Япония	NTSC
Уругвай	PAL		
Фарое острова	PAL		
Фиджи	NTSC		
Филиппины	NTSC		

Обсуждаемую методику можно использовать для получения контуров постоянных E_Q/E_Y и E_I/E_Y: поскольку для линии, соединяющей R и M, расстояния равны:

$$l\frac{E_R}{E_Y}l_{RM},$$

то путем замены E_R/E_Y мы получим:

$$l_{RM}l\left(0.621\frac{E_Q}{E_Y}+0.956\frac{E_I}{E_Y}+1.0\right)$$

Но для всех точек, лежащих на линии, соединяющей R и M, значение v' постоянно и равно v'_R (v-координата R), следовательно:

$$\frac{V'}{U'+V'+W'}=v'=v'_R$$

$$V'=v'_R(U'+V'+W')$$

$$V'(1-v'_R)/v'_R=U'+W'$$

Заменив в последнем уравнении переменные U', V', W' на переменные I, L, Q, и присвоив переменной v'_R значение 0.528, мы получим:

$$L(1-0.528)/0.528=-0.381I+1.168L+0.683Q$$

Следовательно:

$$0.894L = 0.683Q - 0.381I + 1.168L,$$

и, таким образом, получаем уравнение:

$$0.894E_Y = 0.683E_Q - 0.381E_I + 1.168E_Y,$$

которое сокращается до:

$$\frac{E_Q}{E_Y} = 0.557\frac{E_I}{E_Y} - 0.400$$

Но поскольку расстояния вычисляются по выражению:

$$l_{RM}l\left(0.621\frac{E_Q}{E_Y} + 0.956\frac{E_I}{E_Y} + 1.0\right),$$

то, заменив E_Q / E_Y, мы получим:

$$l_{RM}l\left(0.621 \times 0.557\frac{E_I}{E_Y} - 0.621 \times 0.400 + 0.956\frac{E_I}{E_Y} + 1.0\right)$$

Приняв, что $l = 0.299$, вышеприведенное выражение сокращается до:

$$\left(0.389\frac{E_I}{E_Y} + 0.255\right)l_{RM}$$

Таким образом отношение E_I / E_Y будет линейным на протяжении участка RM (нулевая отметка лежит на 22.5% от M). Аналогично, заменив E_I / E_Y, мы получим расстояние для E_Q / E_Y:

$$\left(0.699\frac{E_Q}{E_Y} + 0.504\right)l_{RM}$$

Таким образом, отношение E_Q / E_Y будет линейным на всем протяжении RM (нулевая отметка лежит на 50.4% от M).

И вновь для более удобного шкалирования вместо линии RM мы можем выбрать линии параллельные ей (рис. 22.14). Линии, проходящие через S_C во всех случаях соответствуют нулевой отметке, а линия, идущая от C_Q и проходящая через R (и для которой $E_I / E_Y = 1.99$) использована для позиционирования шкалы E_I / E_Y; линия, выходящая из C_I и проходящая через G (и для которой $E_Q / E_Y = -0.89$), использована для позиционирования шкалы E_Q / E_Y.

22.17 НЕКОТОРЫЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ

В данном разделе мы даем подборку уравнений, которые могут оказаться полезными при выполнении разного рода вычислений для NTSC.

Уравнения связи фотометрической яркости воспроизводимого стимула с колориметрическими количествами кардинальных *RGB*-стимулов:

$$E_Y = 0.299E_R + 0.587E_G + 0.114E_B$$
$$L = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

Уравнения перехода из *RGB*-системы в систему *XYZ* и обратно:

$$1.0(\mathrm{R}) \equiv 0.607(\mathrm{X}) + 0.299(\mathrm{Y}) + 0.000(\mathrm{Z})$$
$$1.0(\mathrm{G}) \equiv 0.174(\mathrm{X}) + 0.587(\mathrm{Y}) + 0.066(\mathrm{Z})$$
$$1.0(\mathrm{B}) \equiv 0.200(\mathrm{X}) + 0.114(\mathrm{Y}) + 1.111(\mathrm{Z})$$

$$X = 0.607R + 0.174G + 0.200B$$
$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$
$$Z = 0.000R + 0.066G + 1.111B$$

$$1.0(\mathrm{X}) \equiv 1.909(\mathrm{R}) - 0.985(\mathrm{G}) + 0.058(\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{Y}) \equiv -0.532(\mathrm{R}) + 1.997(\mathrm{G}) - 0.119(\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{Z}) \equiv -0.288(\mathrm{R}) - 0.028(\mathrm{G}) + 0.902(\mathrm{B})$$

$$R = 1.909X - 0.532Y - 0.288Z$$
$$G = -0.985X + 1.997Y - 0.028Z$$
$$B = 0.058X - 0.119Y + 0.902Z$$

Уравнения перехода от $R - L$, L, $B - L$ к XYZ и обратно:

$$1.0(\mathrm{C_R}) \equiv 0.518(\mathrm{X}) + 0.000(\mathrm{Y}) - 0.034(\mathrm{Z})$$
$$1.0(\mathrm{S_C}) \equiv 0.981(\mathrm{X}) + 1.000(\mathrm{Y}) + 1.177(\mathrm{Z})$$
$$1.0(\mathrm{C_B}) \equiv 0.166(\mathrm{X}) + 0.000(\mathrm{Y}) + 1.098(\mathrm{Z})$$

$$\mathrm{X} = 0.518(R - L) + 0.981L + 0.166(B - L)$$
$$Y = 1.000L$$
$$Z = -0.034(R - L) + 1.177L + 1.098(B - L)$$

$$1.0(\mathrm{X}) \equiv 1.909(\mathrm{C_R}) + 0.000(\mathrm{S_C}) + 0.058(\mathrm{C_B})$$
$$1.0(\mathrm{Y}) \equiv -1.532(\mathrm{C_R}) + 1.000(\mathrm{S_C}) - 1.119(\mathrm{C_B})$$
$$1.0(\mathrm{Z}) \equiv -0.288(\mathrm{C_R}) + 0.000(\mathrm{S_C}) + 0.902(\mathrm{C_B})$$

$$R - L = 1.909X - 1.532Y - 0.288Z$$
$$L = 1.000Y$$
$$B - L = 0.058X - 1.119Y + 0.902Z$$

Уравнения перехода от E_I, E_Y, E_Q к E_R, E_G, E_B и обратно:

$$E_I = 0.736(E_R - E_Y) - 0.268(E_B - E_Y)$$
$$E_Q = 0.478(E_R - E_Y) + 0.413(E_B - E_Y)$$

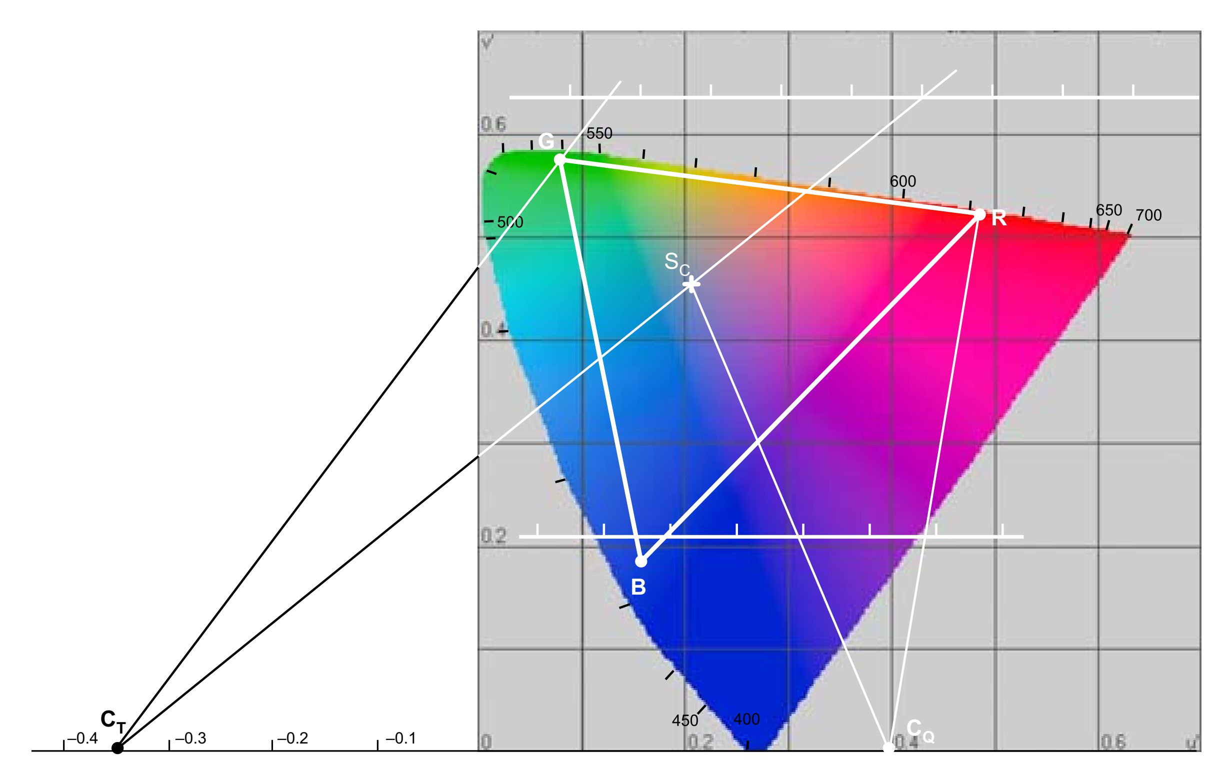


Рис. 22.14 Линии постоянной v', использованные при создании равномерных шкал E_I/E_Y и E_Q/E_Y. Предназначены для отыскания значений на линии постоянного отношения E_I/E_Y, выходящей из C_Q, и на линии постоянного отношения E_Q/E_Y, выходящей из C_I.

$$E_R - E_Y = 0.956E_I + 0.621E_Q$$
$$E_B - E_Y = -1.106E_I + 1.703E_Q$$

$$E_R = 0.956E_I + 1.000E_Y + 0.621E_Q$$
$$E_G = -0.272E_I + 1.000E_Y - 0.647E_Q$$
$$E_B = -1.106E_I + 1.000E_Y + 1.703E_Q$$

$$1.0(C_I) \equiv 0.956(R) - 0.272(G) - 1.106(B)$$
$$1.0(S_C) \equiv 1.000(R) + 1.000(G) + 1.000(B)$$
$$1.0(C_Q) \equiv 0.621(R) - 0.647(G) + 1.703(B)$$

$$E_I = 0.596E_R - 0.274E_G - 0.322E_B$$
$$E_Y = 0.299E_R + 0.587E_G + 0.114E_B$$
$$E_Q = 0.211E_R - 0.523E_G + 0.312E_B$$

$$1.0(R) \equiv 0.596(C_I) + 0.299(S_C) + 0.211(C_Q)$$
$$1.0(G) \equiv -0.274(C_I) + 0.587(S_C) - 0.523(C_Q)$$
$$1.0(B) \equiv -0.322(C_I) + 0.114(S_C) + 0.312(C_Q)$$

Уравнения перехода от I, L, Q к XYZ и обратно:

$$1.0(C_I) \equiv 0.312(X) + 0.000(Y) - 1.247(Z)$$
$$1.0(S_C) \equiv 0.981(X) + 1.000(Y) + 1.777(Z)$$
$$1.0(C_Q) \equiv 0.605(X) + 0.000(Y) + 1.849(Z)$$

$$X = 0.312I + 0.981L + 0.605Q$$
$$Y = 1.000L$$
$$Z = -1.247I + 1.177L + 1.849Q$$

$$1.0(X) \equiv 1.389(C_I) + 0.000(S_C) + 0.936(C_Q)$$
$$1.0(Y) \equiv -0.826(C_I) + 1.000(S_C) - 1.193(C_Q)$$
$$1.0(Z) \equiv -0.454(C_I) + 0.000(S_C) + 0.235(C_Q)$$

$$I = 1.389X - 0.826Y - 0.454Z$$
$$L = 1.000Y$$
$$Q = 0.936X - 1.193Y + 0.235Z$$

Уравнения перехода из XYZ-системы к системе $U'V'W'$ и обратно:

$$1.0(X) \equiv \frac{4}{9}(U') - \frac{1}{3}(W')$$
$$1.0(Y) \equiv 1.0(V') + \frac{2}{3}(W')$$
$$1.0(Z) \equiv \frac{1}{3}(W')$$

$$U' = \frac{4}{9}X$$
$$V' = Y$$
$$W' = -\frac{1}{3}X + \frac{2}{3}Y + \frac{1}{3}Z$$

$$1.0(U') \equiv \frac{9}{4}(X) + \frac{9}{4}(Z)$$
$$1.0(V') \equiv 1.0(Y) - 2(Z)$$
$$1.0(W') \equiv 3(Z)$$
$$X = \frac{9}{4}U'$$
$$Y = V'$$
$$Z = \frac{9}{4}U' - 2V' + 3W'$$

Уравнения перехода от I, L, Q к $U'V'W'$ и обратно:

$$1.0(C_R) \equiv 0.139(U') + 0.000(V') - 0.520(W')$$
$$1.0(S_C) \equiv 0.436(U') + 1.000(V') + 0.732(W')$$
$$1.0(C_B) \equiv 0.269(U') + 0.000(V') + 0.414(W')$$

$$U' = 0.139I + 0.436L + 0.269Q$$
$$V' = 1.000L$$
$$W' = -0.520I + 0.732L + 0.414Q$$

$$1.0(\mathrm{U}') \equiv 2.096(\mathrm{C_I}) + 0.000(\mathrm{S_C}) + 2.635(\mathrm{C_Q})$$
$$1.0(\mathrm{V}') \equiv 0.083(\mathrm{C_I}) + 1.000(\mathrm{S_C}) - 1.664(\mathrm{C_Q})$$
$$1.0(\mathrm{W}') \equiv -1.362(\mathrm{C_I}) + 0.000(\mathrm{S_C}) + 0.704(\mathrm{C_Q})$$

$$L = 2.096U' + 0.083V' - 1.362W'$$
$$L = V'$$
$$Q = 2.635U' - 1.664V' + 0.704W'$$

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Hacking, K., Acta Electronica, 2, 87 (1957).
Loughren, A.V., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 60, 321 and 596 (1953).
Middleton, W.E.K., and Holmes, M.C., J. Opt. Soc. Amer., 39, 582 (1949).
Roizen, J., and Lipkin, R., Electronics, 38, 97 (March 22nd, 1965).
Sproson, W.N., Colour Science in Television Display Systems, p.62, Adam Hilger, (Bristol (1983).
Thomson, L.C., and Wright, W.D., J. Physiol., 105, 316 (1947).
Thomson, L.C., and Wright, W.D., J. Opt. Soc. Amer., 43, 890 (1953).
Townsend, G.B., J. Roy. Television Soc., 17, 63 (1978).
Willmer, E.N., Nature, 153, 774 (1944).
Willmer, E.N., and Wright, W.D., Nature, 156, 119 (1945).
Wright, W.D., J. Opt. Soc. Amer., 42, 509 (1952).

ЛИТЕРАТУРА

Carnt, P.S., and Townsend, G.B., Colour Television: N.T.S.C., Principles and Practice, Iliffe, London (1961),
and Colour Television, VOL. 2, P.A.L., S.E.C.A.M. and Other Systems, Iliffe, London (1969).
Fink, D.G., Color Television Standards, McGraw Hill, New York (1955).
Kaufman, M., and Thomas, H., Introduction to Color T.V., John F. Rider, New York (1954).
Proc. Inst. Radio Engnrs., 39, 1124–1331 (1951).
Proc. Inst. Radio Engnrs., 41, 838–858 (1953).
Proc. Inst. Radio Engnrs., 42, 5–344 (1954).
Proc. Inst. Radio Engnrs., 43, 742–748 (1955).
Theile, R., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 72, 860 (1963).
Townsend, G.B., P.A.L. Colour Television, Cambridge University Press (1970).
Wentworth, J.W., Color Television Engineering, McGraw Hill, New York (1955).

23 КИНОТЕЛЕПРОЕКЦИЯ

23.1 ВВЕДЕНИЕ

Большое число потенциальных телепрограмм — это традиционные кинофильмы. Еще в эпоху раннего монохромного телевидения для их теледемонстрации требовалось соответствующее оборудование, позволявшее получать телевизионные сигналы с кинопленок. Такое оборудование относят к классу *кинотелепроекционной аппаратуры*[1], которая делится на три основных типа:

— аппараты на базе передающих трубок телекамер;

— аппараты на базе кинотеледатчиков бегущего луча;

— аппараты на матрицах линейных твердотельных датчиков.

В отношении новых программ, которые чаще всего не предназначены к прямому эфиру, имеющаяся аппаратура дает телепродюсерам выбор между телесъемкой с записью на магнитную ленту и киносъемкой, фиксирующей изображение на обычную цветную кинопленку.

Преимущество магнитных пленок состоит в том, что изображение может быть воспроизведено сразу после съемки, тогда как кинопленка требует предварительной химической обработки. Однако же последняя применяется повсеместно и как минимум по шести причинам:

— во-первых, кинокамеры гораздо дешевле и намного практичнее при натурных съемках, нежели телекамеры и видеокамеры;

— во-вторых, кинопленка проще в монтаже;

— в-третьих, кинопленка дольше хранится;

— в-четвертых, кинопленка позволяет получать сигналы, подходящие любой телесистеме (к примеру, 525-строчной NTSC, 625-строчной PAL и т.д.), то есть, как говорят «сигналы, свободно преобразуемые в любой стандарт», что крайне важно, когда одна и та же программа транслируется на разные страны;[2]

— в-пятых, получение дублей обходится дешевле (Hayer и Verbrugghe, 1972);

— в-шестых, качество изображения, полученное с кинопленки, чаще всего намного выше качества телевизионных изображений.

Из перечисленных соображений телепередачу, исходно снятую телекамерой, иногда копируют на кинопленку. Такое копирование именуется *телезаписью на кинопленку* (*телекинозаписью*).

23.2 КИНО- И ТЕЛЕМЕТОДЫ

При съемке телефильмов могут применяться обычные кинометоды, задействующие одну кинокамеру, единожды и определенным образом поставленный свет и один

---

[1] Во избежание путаницы здесь и далее термин «telecines» будет переводиться контекстно и в зависимости от направления действия, т.е. либо «кинотелепроекция», либо «телекинопроекция». — *Прим. пер.*

[2] Безусловно, вполне осуществимо и электронное преобразование сигналов из одного стандарта в другой, но только при помощи дорогостоящего оборудования.

мизанкадр. Такая практика хлопотна и трудоемка, но позволяет при этом добиваться результатов очень высоко качества.

Телевизионная тактика традиционно задействует три телекамеры и освещение компромиссное для всех трех; при этом мизанкадр оперативно выбирается с трех мониторов по ходу программы. Такая практика много проще, но, вместе с тем, неизбежно дает результаты меньшего качества (см. рис. 23.1).

Как уже было сказано выше, некоторые программы снимают телекамерами (и с использованием сугубо телевизионных методов), причем даже тогда, тогда на выходе требуется кинофильм: сюжет записывается на магнитную ленту, а затем тем или иным способом переносится на кинопленку. Преимущество такого подхода состоит в том, что результат можно получить быстро и сравнительно дешево, а также, в случае необходимости, монтировать в программу разного рода спецэффекты. Однако описанный прием используется редко (Wayne, 1973), и, если и применяется, то в системах телевидения высокой четкости (см. раздел 19.16).

23.3 КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕЛЕКИНОКАМЕРЫ

Еще одним методом, позволяющим получить запись телепрограммы на кинопленке является применение специальных камер, которые одновременно экспонируют кинопленку и выдают телесигналы. Телевизионные сигналы в дальнейшем используются при монтаже и редактировании отснятой программы, тогда как пленка обеспечивает основную запись. В свое время для этих целей были разработаны камеры систем *Electronicam* (Caddigan и Goldsmith, 1956; Spooner, Pryke и Gardiner, 1968), *Gemini* и *Addavision*.

В перечисленных системах во избежание параллаксов теле- и киноизображения образуемых одним и тем же объективом, применялся специальный светоделитель (представлявший собой вращающиеся зеркальные лопасти), направлявший световой поток то в один, то в другой отделы камеры. В целях экономии пленка начинала движение только тогда, когда телекамера вела фактическую съемку. Однако поскольку у киноблока камеры для обеспечения адекватной рабочей скорости было пять кадровых окон, киносъемка по отношению к телесъемке запаздывала на одну пятую секунды по каждому кадру. Впрочем, такая задержка была вполне приемлемой. Монтаж кинозаписи проводился либо при помощи специальной маркировки, позволявшей идентифицировать длину пленки, соответствующую тому или иному сюжету, либо за счет одновременной вспомогательной кинозаписи с телемонитора.

Отметим, что несмотря на потенциальные преимущества описанной системы большинство телефильмов по сей день снимаются обычными кинокамерами и с помощью традиционных кинометодик.

23.4 ВЫБОР ПЛЕНКИ

Предпочтительно, чтобы кинопленка, применяемая в фактическом телевещании, была копировальной, но не оригинальной: дело в том, что всегда остается высокой вероятность повреждения оригинала, монтажные стыки нетехнологичны, плюс к тому, часто возникает необходимость в получении запаса идентичных друг другу копий. Следовательно, оптимальными оказываются негативно-позитивные системы. При этом обращаемо-обращаемые и позитивно-позитивные системы тоже находят себе применение в решении некоторых задач (см. раздел 12.11), в частности, когда позитивное изо-





Рис. 23.1 Для передачи фактур требуется высокое разрешение мелких деталей, особенно в высоких светах. Поскольку в телевидении, с его ограниченным разрешением, для общих планов предпочтительны короткофокусные объективы, а для передачи фактур — длиннофокусные, особую популярность приобрели зум-объективы.

бражение, полученное на оригинальной пленке, используется в оперативном редактировании отснятого материала. Наконец отметим, что оригинальный позитив и негативная пленка тоже находят свое применение в кинотелепроекции (см. раздел 23.14)[1].

23.4.1 Формат пленки

Можно предположить, что при весьма ограниченной четкости телевизионных изображений нет необходимости в использовании 35 мм кинопленки и что 16 мм пленка даст вполне резкое изображение. Стоит напомнить, однако, что в любой системе потери резкости возникают на пространственных частотах много меньших предельной, и потери эти, как говорят, мультипликативны: к примеру, 16 мм система, состоящая из объектива, негативной пленки и копировальной пленки, на выходе дает 25% потери контраста между деталями пространственной частоты в 200 линий на ширину изображения, а телевизионные системы вносят еще примерно столько же. В результате, общие потери MTF при телетрансляции 16 мм фильма составляют порядка 44% ($3/4 \times 3/4 = 0.56$). Таким образом, хотя 25% потерь могут оказаться незамеченными (то есть, либо в изображении на пленке, либо в телеизображении), суммарный эффект порой бросается в глаза. Поэтому для получения наилучших результатов желательно применять 35 мм кинопленку.

23.5 ПОЛУЧЕНИЕ ТЕЛЕСИГНАЛОВ С ЦВЕТНОЙ КИНОПЛЕНКИ

В норме профессиональная кинопленка фиксирует 24 кадра в секунду, но поскольку свет прерывается и возникает весьма заметное мелькание изображения, кинопроекторы вместо одного обычно задействуют два (иногда три) темновых периода на изображение (благодаря чему частота растет до 48 [или до 72] кадров в секунду, то есть до величин, при которых мелькание почти незаметно [см. раздел 12.12]).

Первый темновой период уходит на продергивание пленки в фильмовом канале от одного кадра к следующему, в результате чего последовательность событий становится таковой, как показана на рис. 23.2 (a): изображение проектируется в виде отдельной вспышки в течение примерно 1/96 секунды, после чего наступает темновой период, который длится также примерно 1/96 секунды.

Однако же в телевизионном изображении ситуация иная (что показано на рис. 23.2 [b]), и телевизионный эквивалент периоду смещения кинопленки от одного кадра к другому (последний именуется *временем продергивания*) — это время, которое электронный пучок движется от конца нижней строки изображения в начало верхней строки (именуется как *время обратного хода пучка*).

Время обратного хода может быть очень коротким, и интервал между окончанием сканирования одного кадра и началом сканирования следующего оказывается обычно меньше 10% от одного цикла частоты кадров, что составляет примерно 1/500 секунды в 50 герцовых системах и 1/600 секунды — в 60 герцовых. Таким образом, когда свет от обычного кинопроектора идет в телекамеру, он воздействует на передающие трубки лишь половину времени, уходящего на сканирование одного кадра. Следовательно, в производстве телефильмов требуются специальные методы и специальная конструкция кинотелепроекционной аппаратуры.

---

[1] В этом случае инверсия изображение и вычитание маски выполняются электронным путем — *Прим. пер.*

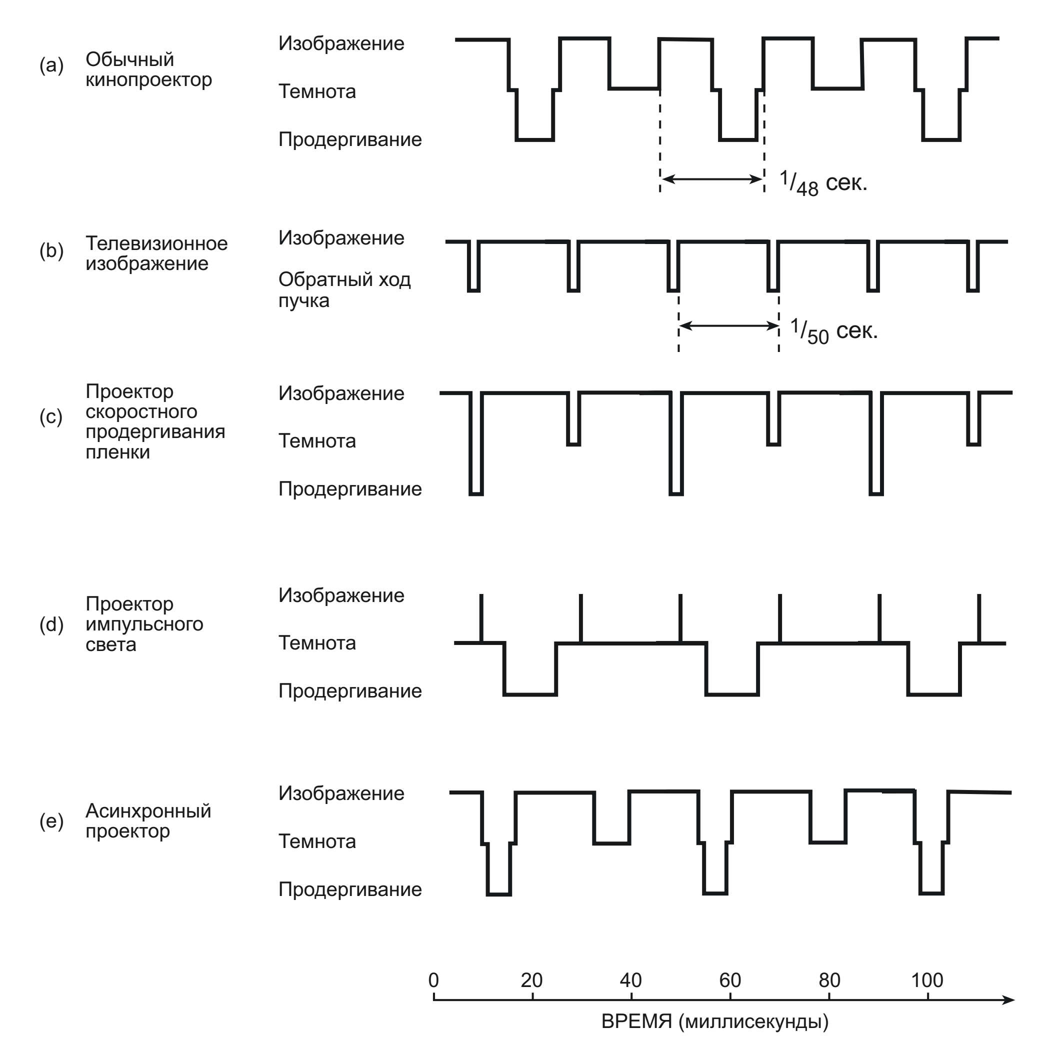


Рис. 23.2 Схематичное представление отношения кинопроекции при 24 кадр/с к телевизионному показу при 50 полукадр/с.

23.6 СИСТЕМА СКОРОСТНОГО ПРОДЕРГИВАНИЯ КИНОПЛЕНКИ

В свое время было показано, что только в 16 мм кинотелепроекционное оборудование (но не 35 мм) можно вмонтировать механизм особо быстрого (скоростного) продергивания кинопленки, позволяющий сдвигать пленку на один кадр за 1/750 секунды (Wheeler, 1969), в результате чего время продергивания оказывается сопоставимым с временем обратного хода электронного пучка. Альтернативный вариант: пленка движется плавно, но при этом для представления серии статичных изображений (с очень короткими интервалами между этими изображениями) используются специальные оптические устройства, в частности, барабанные зеркала. Если такие проекторы работают со скоростью 25 кадр/с (а не 24 кадр/с), то для 50 кадровой телевизионной системы ситуация будет таковой как показана на рис. 23.2 (с).

Если время продергивания пленки у проектора синхронизировано с временем обратного хода телевизионного электронного пучка, на экране можно получить изображения вполне удовлетворительного качества. При этом легкое отклонение частоты

кадров от 24 кадр/с до 25 кадр/с обычно остается визуально незамеченным, но если пленка экспонируется специально в телевизионных целях, кинокамера может работать и на бóльших скоростях.

23.7 КИНОТЕЛЕПРОЕКЦИЯ НА ПЕРЕДАЮЩИЕ ТРУБКИ

Кинотелепроекция, задействующая связку «кинопроектор-телекамера», — это технологически самый простой вариант, поскольку некоторые трубки, такие, в частности, как видикон, способны в промежутках между проходами электронного пучка сохранять изображение в виде электрических зарядов (вследствие чего отпадает необходимость в том, чтобы оптическое изображение держалось в течение всего периода сканирования изображения электронного). Фактически период оптического изображения сцены можно ограничить единичной вспышкой, появляющейся в момент обратного хода пучка (см. рис. 23.2(d)). Продолжительность вспышки составляет примерно 1/1000 с, что достигается с помощью вращающихся секторов, либо импульсных световых источников.

С регистрирующими трубками, способными устойчиво держать электронное изображение, можно работать без точной синхронизации системы продергивания пленки в кинокамере с обратным ходом пучка телекамеры, однако в этом случае желательно, чтобы время экспозиции трубки составляло минимум 60% от общего времени (в противном случае те участки изображения, по которым будет идти электронный пучок в период экспозиции будут заметно отличаться от остальных).

Конструкция обсуждаемого типа показана на рис 23.2 (e): легкое смещение фазы между продергиванием пленки и обратным ходом пучка телекамеры не имеет значения.

Наконец отметим, что следствием повсеместного использования видиконов и плюмбиконов было то, что в большинстве случаев применялся последний вариант работы кинотелесистемы, в частности с четырьмя трубками (см. раздел 20.9).

23.8 КИНОТЕЛЕПРОЕКЦИЯ ПРИ 60 ПОЛУКАДРАХ В СЕКУНДУ

Когда телесистема работает со скоростью 60 полукадров в секунду, ситуация существенно усложняется тем, что скорость движения пленки в фильмовом канале не может быть поднята с 24 до 30 кадр/с без заметных искажений при визуализации движущихся объектов. Однако при 24 кадр/с кинопленка не может проектироваться на передающие трубки, сохраняющие электронные изображения, поскольку разнос между кинематографическими 24 кадр/с и 30 кадр/с (60 полукадр/с) телесъемки приведет к паразитной пульсации телевизионного сигнала. Последнее вызвано тем фактом, что интервал между последовательными телевизионными кадрами будет частично попадать на темновой период кинопоказа (продергивание), частично на световой (рис. 23.2 (a) и (b)). Следовательно, остается принять один из тех вариантов конструкции кинотелепроекционной системы, что показаны на рис. 23.3 (c), (d) и (e).

В предлагаемых вариантах каждая пара изображений с кинопленки дает пять телевизионных кадров: то есть, первое изображение на пленке дает два телекадра, занимая при этом 2/60 = 1/30 с, а второе — три, занимая 3/60 = 1/20 с.[1] Таким образом, два изображения вместе займут 5/60 = 1/12 с, что необходимо для удержания приблизи-

[1] Система 2:3 — *Прим. пер.*

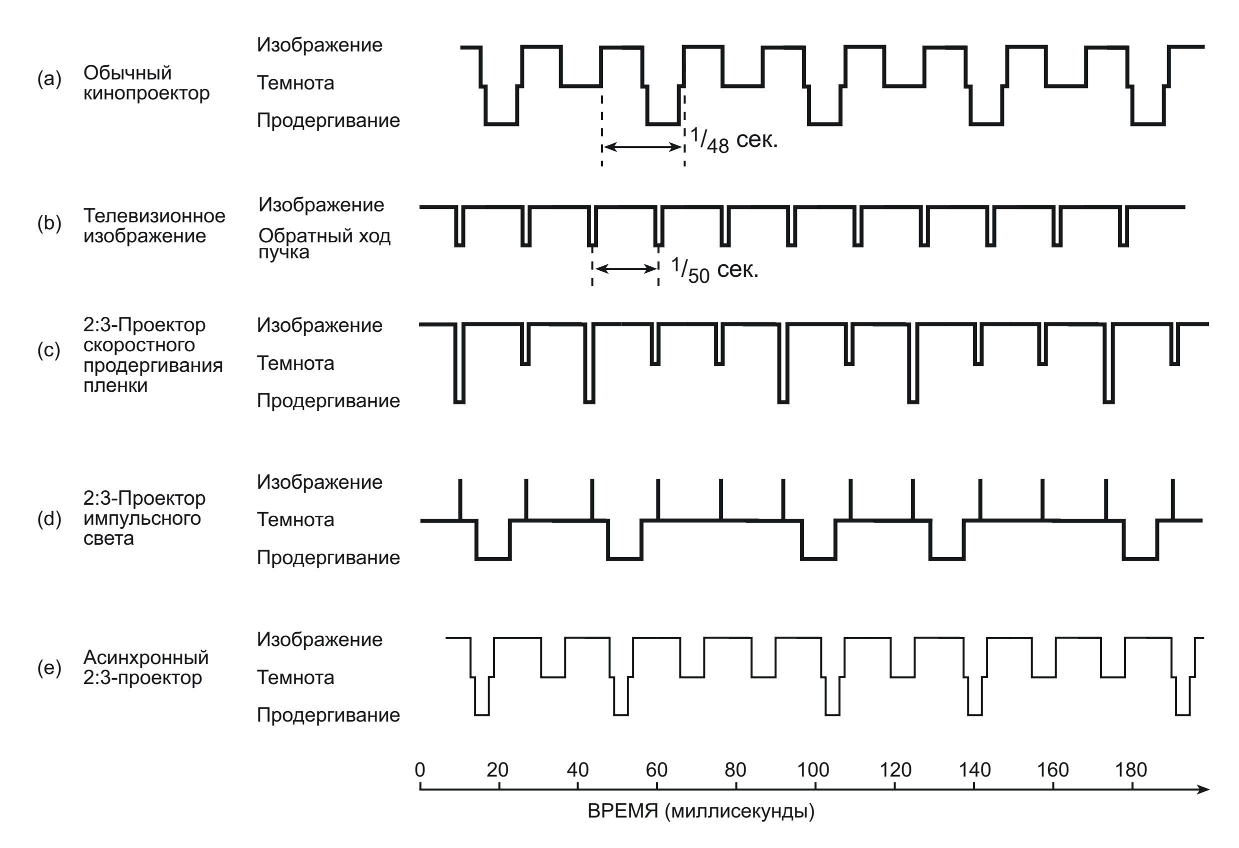


Рис. 23.3 Схематичное представление отношения кинопроекции при 24 кадр./с к телевизионному показу при 60 полукадр./с.

тельных 24 кадр/с; при этом телевизионные полукадры идут с номинальной частотой 60 полукадр/с. Описанные системы именуются *асинхронными* (рис. 23.3 [e]) и широко использовались с видиконовыми и плюмбиконовыми камерами.

23.9 КИНОТЕЛЕДАТЧИК БЕГУЩЕГО ЛУЧА

Альтернативным способом получения трихроматических телевизионных сигналов с цветной кинопленки является применение т.н. *кинотеледатчика бегущего луча* (см. рис. 23.4). В данном случае изображение разбивается на строки *до* того, как свет пройдет через пленку, а не после. Немодулированный (т.е. белый по всей поверхности) телевизионный строчный растр воспроизводится электронно-лучевой трубкой, имеющий очень короткий период послесвечения (однако даже при самых лучших люминофорах требуется применение схемы его коррекции). Строки растра проецируются на пленку, после чего световой поток делится на красную, зеленую и синюю компоненты, экспонирующие три отдельных фотоумножителя. Фотоумножители одновременно воспроизводят три сигнала, величина которых есть функция от коэффициента пропускания по коротковолновой, средневолновой и длинноволновой частям видимого спектра в каждой точке изображения.

Очевидным преимуществом устройства является то, что регистрация трихроматических изображений зависит только от времени отклика умножителей и их электронных схем (последние можно изготовить практически идентичными между собой).

Если пленка остается неподвижной на все время сканирования каждого полукадра, устройство должно использоваться в связке с проектором быстрого продергивания; если пленка движется равномерно, для иммобилизации изображений должны использоваться специальные устройства (когда частота полукадров в системе составляет 60 Гц должна использоваться аппаратура категории 3:2).

Когда требуется чересстрочная развертка, пленка может двигаться равномерно: при этом на трубке, лишенной вертикальных аберраций, изображение формируется за счет единичной линии, а движение самой пленки обеспечивает вертикальный сканирующий эффект.

Стоит сказать, что необходимость в чересстрочной развертке безусловно усложняет ситуацию, поэтому обычной практикой является получение *пар* изображений с *частично ослабленным строчным растром* при непрерывно движущейся пленке. Системы описанного типа широко применялись при частоте 50 полукадр/с.

В первых телекинопроекционных системах данного типа два набора растров получались с одного монорастрового дисплея за счет двух объективов. Однако в дальнейшем требуемые растры стали получать электронным путем на одной и той же электронно-лучевой трубке (Godden, 1975; Journal of the Royal Television Society, 1976; Swinson, 1989). Отметим, что для достижения аналогичных результатов в системах типа 3:2 требуются более сложные конструкции растров (Whitehead, 1965).

Кинотеледатчики бегущего луча также широко применялись при получении телесигналов с цветных слайдов. В данном случае, разумеется, не возникало никаких проблем с продергиванием пленки и/или фиксацией изображения.

Наконец отметим, что наряду с кинотелеоборудованием проекционного типа (см. раздел 20.9), датчики бегущего луча могут использоваться в связке с четырехсенсорными телекамерами. Но главное достоинство такой связки состоит в отсутствии проблем пространственной приводки (совмещения) трихроматических изображений (Taylor, 1965).

23.10 КИНОТЕЛЕПРОЕКЦИЯ НА ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Благодаря своей компактности, надежности и простой схеме электропитания твердотельные датчики стали в свое время весьма заманчивой альтернативой трубочным телекамерам или трубкам на основе фотоэлектронных умножителей. Если матрица твердотельных датчиков в телекамере стандартного широковещательного телевидения должна иметь как минимум 600×575 элементов, то в деле кинотелепроекции можно ограничиться *линейкой* сенсоров, т.е. сенсоров, расположенных в один ряд. Линейка много проще в изготовлении и может содержать до двух тысяч элементов.

Свет из щелевой горизонтальной секции кадрового окна фокусируется объективом на сенсорной линейке, которая затем используется для строчного сканирования, выполняемого путем считывания зарядов, индуцированных световой энергией (то есть, как и во всех остальных приборах с зарядовой связью). Поле сканирования образуется за счет равномерного движения пленки. Линейки, состоящие из 1024 элементов и из 2048 для широковещательного телевидения и ТВЧ соответственно обеспечивают вполне адекватное пространственное разрешение.

Отметим, что линейку невозможно изготовить такой, чтобы все ее сенсорные элементы обладали одинаковой чувствительностью, поэтому (дабы избежать появления на изображении паразитных вертикальных полос) т.н. *правильную форму волны* стараются удержать электронным путем.

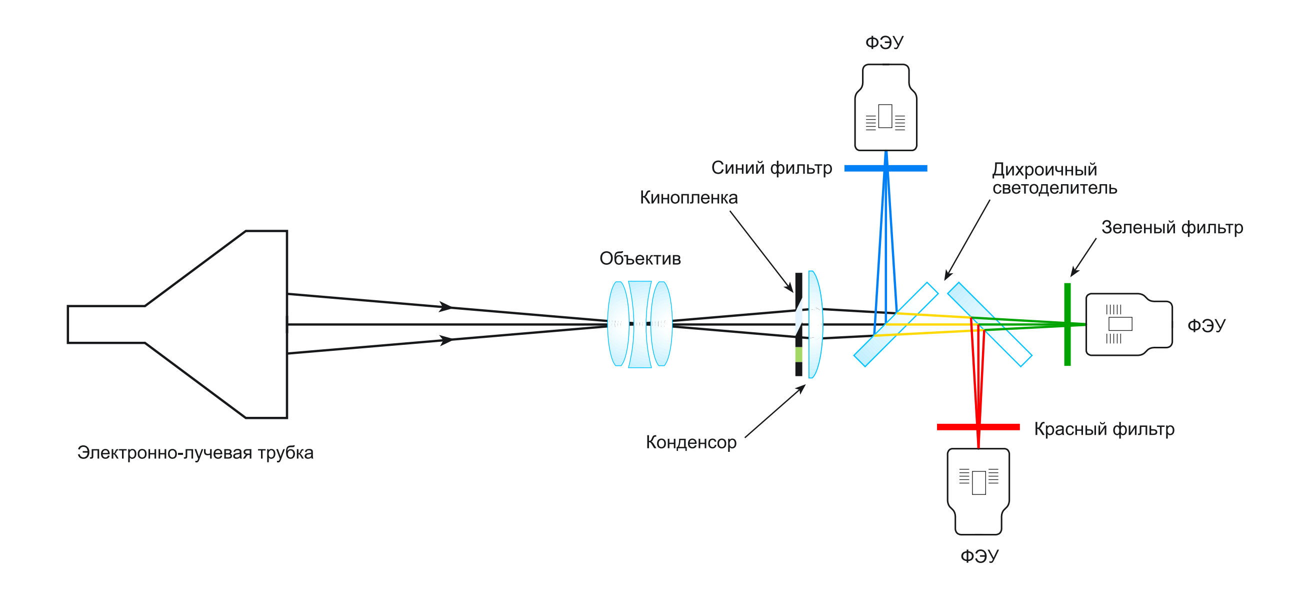


Рис. 23.4 Типичное устройство сканера бегущего луча.

Двух-трех компонентная чересстрочная развертка реализуется за счет сохранения всех сигналов с каждого кадра в т.н. *кадровом буфере* с последующим считыванием информации для телевизионных полукадров (если требуется). Сигналы обычно хранятся в цифровом виде, благодаря чему без особого труда задается корректная форма волны (Childs и Sanders, 1978 и 1980; Poetch, 1978).

Наконец отметим, что трихроматические сигналы удобно получать, деля свет на отдельные коротковолновый, средневолновый и длинноволновый компоненты при помощи блока дихроичных призм, таких как в свое время применялись в телекамерах (см. раздел 20.6) и согласованных, соответственно, с тремя пространственно-идентичными CCD-линейками, расположенными в фокальных плоскостях трех световых потоков. Разумеется, линейки должны быть точно приведены друг к другу относительно оптического изображения, но их малый пространственный размер здесь весьма на руку.

23.11 ТЕЛЕКИНОЗАПИСЬ

Когда возникает ситуация обратная описанным выше, т.е. появляется необходимость зафиксировать на кинопленке передачу с экрана телевизионного монитора, то сталкиваются все с теми же проблемами несовпадения частоты кадров с периодом продергивания пленки.

23.11.1 Синхронизация

23.11.1.1 Экспозиционная последовательность 2:3

Одним из вариантов решения проблемы синхронизации при телекинозаписи является обеспечение *экспозиционной последовательности* 2:3 при частоте кадров 60 кадр/с — это значит, что два телекадра работают 1/30 с, после чего три телекадра

— 1/20 с. Однако, во избежание появления на кинопленке чередующихся изображений разной визуальной плотности (из-за разной экспозиционной выдержки), необходимо оперативно управлять уровнем экспозиции.

Проблема продергивания решается либо путем применения камеры скоростного продергивания (реализуемого, как уже говорилось выше, или за счет механизма прерывистого движения, или за счет оптического блока при непрерывном движении), либо путем применения люминофоров с длинным периодом послесвечения.

В последнем варианте телевизионные сигналы будут оптически «усиленными» на всем протяжении периода сканирования, что обеспечит равномерную интенсивность экспозиции по всему полю изображения.

23.11.1.2 Подавленный полукадр

Один из двух (или трех) телевизионных кадров на каждый кинокадр закрывается, а пленка в этот момент продергивается. Данный метод именуется *телекинозаписью с подавленным полукадром* и по критерию четкости дает результаты эквивалентные примерно половине исходной четкости или чуть выше (поскольку чересстрочная развертка сама по себе снижает разрешение, особенно у изображений движущихся объектов).

23.11.1.3 Двойной растр

Еще одним вариантом синхронизации является чересстрочная развертка, реализуемая по методу т.н. *двойного растра*, аналогичного тому, что используется в кинотелепроекционном оборудовании. Мы знаем, что метод скоростного продергивания не может применяться с пленками шире 16 мм, но поскольку и 16 мм пленки иногда оказываются адекватными задачам телекинозаписи, скоростное продергивание применяется весьма широко.

23.11.2 Экспозиция при кинотелезаписи

23.11.2.1 Триноскоп

В контексте разговора об адекватной экспозиции при телекинозаписи также интересен *триноскоп* (см. раздел 21.2), применявшийся в системе Videoprinting (Venis, 1969; Lisk и Evans, 1973). Плюс к тому, были разработаны системы в которых использовались трубки с теневой маской и высокой светоотдачей (Lisk и Evans, 1971; Lisk, 1979).

23.11.2.2 Лазерное экспонирование

Еще одним способом повышения мощности экспонирующего света является использование специальных лазеров, дающих красный, зеленый и синий сканирующие световые пучки, отклоняемые оптически. Горизонтальное сканирование в этих устройствах осуществлялось с помощью конического спиннера с зеркальными фасетками и моторным приводом; сканирование по вертикальному направлению обеспечивалось зеркальцем гальванометра. Световых модуляций добивались за счет специальных электрооптических устройств на основе кристаллов дигидрофосфата аммония (ADP) или акустооптических дифракционных ячеек (Beiser, Lavender, McMann и Walker, 1971; Swan, 1974).

23.11.2.3 Экспонирование через фильтры

Если телевизионные сигналы, которые должны быть зафиксированы на кинопленке были вначале записаны на магнитную ленту (заурядная ситуация), кинопленка может последовательно экспонироваться монохромным дисплеем через красный, зеленый и синий фильтры путем тройного прогона этой ленты. Данный метод применялся в системах *Vidtronics*, разработанных компанией Technicolor (Mulliner, 1969).

23.11.2.4 Имидж-трансформ-системы

Для обеспечения максимально высокой четкости результирующего изображения используются т.н. *имидж-трансформ-системы*, в которых путем электронно-лучевого экспонирования в вакууме на черно-белой пленке фиксируются три позитивных сепарации, после чего позитивы эти последовательно копируются на цветную негативную промежуточную пленку. Последняя используется для получения окончательных позитивных копий (Comandini и Roth, 1978).

23.11.2.5 Экспонирование электронно-лучевой трубкой

Статичные изображения можно зафиксировать на пленку с обычного дисплея (такого, в частности, как трубка с теневой маской) и при помощи заурядных фотографических методов. Экспозиционная выдержка при этом должна быть достаточно длинной, захватывающей как минимум два телевизионных полукадра (обычно 1/25 или 1/30 с при центральных затворах и 1/8 с — при фокальных).

Для пленки, сбалансированной по дневному свету и чувствительностью в 64 ASA, обычно нужна выдержка порядка 1/8 с при диафрагме 2.8, но при этом для оптимизации хроматического баланса обычно требуются цветокоррекционные фильтры (см. табл. 10.3).

23.12 ЭЛЕКТРОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИГНАЛАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ С ЦВЕТНЫХ КИНОПЛЕНОК

Кинофильм, демонстрируемый в темном помещении, воспринимается нами как динамическое изображение почти абсолютного качества. Но когда этот же фильм, прошедший через процедуру кинотелепроекции, транслируется по телевидению, качество видеоряда заметно снижается. К примеру, если кинокопия имеет легкий паразитный сдвиг по цветовому тону, то при кинопоказе в темном помещении сдвиг этот очень быстро исчезает (за счет хроматической адаптации зрения — *Прим. пер.*), но при телепоказе этой копии, точнее при ее телепросмотре в помещении с определенным окружающим освещением, любое отклонение бросается в глаза. Однако же, управляя относительными амплитудами трихроматических сигналов, выдаваемых кинотелепроекционным оборудованием, паразитные хроматические сдвиги легко корректируются.

При недостаточном контроле за обработкой кинопленки, либо при отклонении от номинальных значений гамма в трихроматических каналах кинотелепроекционного аппарата, может возникнуть рассогласование по гамма трихроматических воспроизводящих изображений. Дефекты такого порядка также можно компенсировать электронным путем. Более того: некоторая электронная манипуляция возможна даже тогда, когда у киноматериала имеет место разнос дифференциальных гамма на разных уровнях оптических плотностей (Wood, Sanders и Griffits, 1965).

Стоит сказать также, что возможна организация системы автоматического управления, действующей по ходу передачи фильма, что достигается путем предпросмотра этого фильма, коррекции сигналов по каждому сюжету, фиксации установок управления за счет записи величин коррекции в *конец* каждого сюжета и последующем приложении этих величин к началу следующего. Процедура реализуется за счет того, что по ходу фильма срабатывают специальные *сигнальные метки*, указывающие системе на период и характер необходимой коррекции. Наряду с этим существуют и т.н. *детекторы смены сюжетов*, посредством которых изменения выявляются автоматически: реакция происходит на сильные изменения сигналов, характерные для смены сцен (но не для изменений в самих сценах) (Kitson, Palmer, Spencer, Sanders и Weston, 1972).

Прочие методы автоматической коррекции сигналов, полученных с цветных кинопленок, включают в себя применение устройств автоматической регулировки уровня белой и черной точек, а также устройств позволяющих привести интегральную цветность изображений к серому (Pay, 1970; Pullinger и Reeves, 1970; Marsden, 1978).

Методы повышения качества кинопоказа по телевидению включают в себя также применение эталонного изображения, скопированного со стандартного негатива и расположенного в начале каждой ленты (Knight, 1970; Brown, 1970).

Наконец отметим, что разработаны способы повышения качества черного, аналогичные применению black-сепарации в полиграфии (см. рис. 26.7), что особенно подходит при работе с пленками, экспонированными на очень низких уровнях освещения (Godden, 1977).

23.13 ЭЛЕКТРОННОЕ МАСКИРОВАНИЕ

23.13.1 Электронное маскирование при кинотелепроекции

Даже тогда, когда хроматический баланс, общие коэффициенты контрастности, поканальные значения гамма и форма тон-репродукционных кривых кинофильма и телесистемы идеально совпадают друг с другом, конечный результат кинотелепроекции может оказаться неудовлетворительным. Так бывает потому, что и киносистема, и система телевизионная вносят определенные погрешности в процесс цветовоспроизведения, проявляющие себя, в первую очередь, снижением чистоты цвета воспроизводимых стимулов. Однако же, несмотря на то, что погрешности эти сами по себе не вызывают визуального дискомфорта, их мультипликативный эффект может легко выйти за рамки допустимого.

Особо остро проблема проявляет себя тогда, когда в одной и той же передаче присутствуют кино- и магнитная записи одного и того же сюжета (Corbett, 1969), но при этом процедура электронной коррекции сигналов, получившая название *электронного маскирования*, может существенно улучшить конечный результат (Burr, 1954; Brewer, Ladd и Pinney, 1954; Wood и Griffiths, 1966).

Если требуется, чтобы характеры тоновоспроизведения и воспроизведения цветностей теле- и кинофрагментами передачи были максимально близки друг к другу, нужно, чтобы данные, приходящие на вход т.н. *операции формирования кода передачи*, были идентичными (см. рис. 23.5).

Когда спектральные чувствительности телекамеры и кинопленки различны, точное копирование невозможно. Поэтому для оптимального маскирования требуются случайная выборка и взвешивание тестовых стимулов, а также оценка погрешности их воспроизведения в контексте общего качества репродуцируемого изображения. К

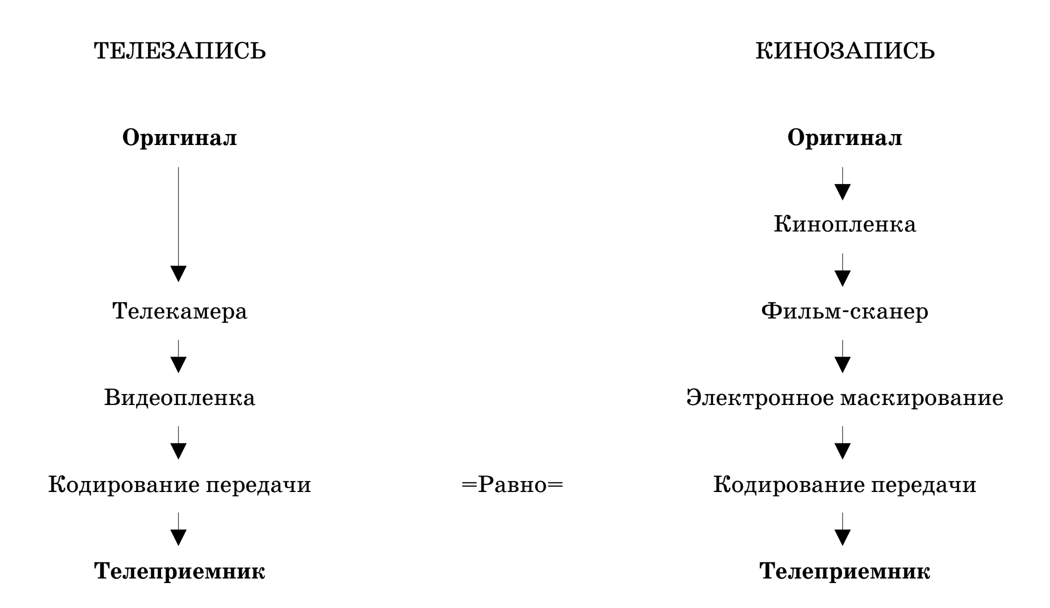


Рис. 23.5 Сравнение последовательности операций при телетрансляции одной и той же программы, записанной на магнитную ленту и на кинопленку.

сожалению, выбор, взвешивание и оценка тестовых стимулов могут быть выполнены лишь приблизительно, и, следовательно, простыми путями можно получить лишь весьма приблизительные результаты.

Было показано однако (Evans, Hanson и Brewer, 1953), что эффекты изменения спектральных чувствительностей в цветорепродукционных системах зачастую оказываются весьма незначительными и можно рассчитывать на то, что параметры оптимального электронного маскирования можно вычислить и без учета разницы в спектральных чувствительностях телекамеры и кинопленки. В этом случае результат будет удовлетворительным по всем цветовым стимулам, воспроизводимым на тех уровнях оптических плотностей, на которых тонопередающая характеристика киноматериала и межслойные эффекты в нем линейны (в логарифмических осях).

23.13.1.2 Аналитический расчет коэффициентов

Для расчета меры необходимого электронного маскирования нужно знать соотношение между параметрами оптического входа кинокамеры и параметрами электронного выхода кинотелепроекционного аппарата. Сие легко выполнимо путем последовательного экспонирования каждого из слоев кинопленки на уровнях над и под точкой средне-серого. Скорость изменения логарифмов[1] «красного», «зеленого» и «синего» сигналов в кинотелепроекционном аппарате относительно логарифмов экспозиций кинопленки можно затем определить либо непосредственно, либо путем денситометрии (при условии, что спектральные чувствительности пленки соответствуют пока-

[1] Логарифмированные величины используются потому, что большинство погрешностей цветовоспроизведения, корректируемых электронным маскированием, сопряжены с *паразитными оптическими плотностями* красителей, которые, в свою очередь, примерно пропорциональны их *полезным оптическим плотностям*.

нальным спектральным чувствительностям кинотелепроекционного аппарата). В результате получаются девять значений скоростей изменения логарифмов (гамма):

Трихроматический канал кинотелепроекционного аппарата (выход)	Послойные гамма киноматериала (вход) Длинноволновочувствительный слой	Средневолновочувствительный слой	Коротковолновочувствительный слой
«Красный»	γ_{rr}	γ_{gr}	γ_{br}
«Зеленый»	γ_{rg}	γ_{gg}	γ_{bg}
«Синий»	γ_{rb}	γ_{gb}	γ_{bb}

Если данный комплект гамма-значений представить в виде матрицы «*M*», логарифмы экспозиций каждого из слоев кинопленки обозначить как o_r, o_g, o_b, а логарифмы выходных сигналов кинотелепроекционного аппарата как p_r, p_g, p_b, то:

$$\begin{pmatrix} p_r \\ p_g \\ p_b \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} o_r \\ o_g \\ o_b \end{pmatrix}$$

Инвертируя *M*-матрицу (см. Приложение 1), получим:

$$\begin{pmatrix} o_r \\ o_g \\ o_b \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} p_r \\ p_g \\ p_b \end{pmatrix}$$

Если использовать M^{-1} в качестве т.н. *маскирующего эквивалента*, т.е., получить тем самым значения маскированных сигналов

$$\begin{pmatrix} p_{rm} \\ p_{gm} \\ p_{bm} \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} p_r \\ p_g \\ p_b \end{pmatrix},$$

то на вход этапа телетрансляции будут поданы точно такие же сигналы, как если бы оригинальная сцена непосредственно регистрировалась телекамерой (если, конечно, не обращать внимания на различия в спектральных чувствительностях телекамеры и кинопленки, а также нелинейность на концах характеристических кривых последней).

23.13.1.2 Эмпирический подбор коэффициентов

Маскирующий эквивалент (т.е. значения коэффициентов M^{-1}) можно определить не только за счет вычислений, но и эмпирически, путем серии практических тестов: кинопленка экспонируется так, как показано на рис. 23.6 (а), т.е. чтобы получить восемь вертикальных стрипов (два серых и шесть хроматических), в которых каждый

слой имеет два варианта экспозиции — E_1 и E_2 — представляющих определенное приращение над и под средне-серым. Значения масок затем выбираются так, чтобы величины трихроматических сигналов, посылаемых на электронно-лучевую трубку (рис. 23.6 [b]), подходили к одному из уровней, выдаваемых серыми стрипами; девять значений гамма электронных масок в этом случае будут пропорциональны соответствующим значениям матрицы M^{-1}. Отметим, что при правильном подборе общей гамма системы (за счет управления уровнями белой и черной точек электронно-лучевой трубки) значения масок могут достичь точных значений коэффициентов матрицы M^{-1}. Таким образом корректное маскирование достигается без визуальной подгонки коэффициентов или калибровки механизма электронного маскирования (Hunt, 1978).

23.13.1.3 Коррекция коэффициентов

Отметим наконец, что на практике различные системные нелинейности могут не позволить выполнить корректное маскирование на всех уровнях одновременно, и может потребоваться некий компромисс. Плюс к тому, из-за того, что спектральная чувствительность длинноволновочувствительного слоя кинопленок несколько сдвинута в дальний «красный» конец спектра (рис. 4.3), иногда возникает необходимость в корректировке коэффициентов M^{-1}. Поэтому на практике часто применяется пониженный уровень маскирования (Staes, 1977).

23.13.2 Электронное маскирование при телекинотелепроекции

Электронное маскирование может применяться для улучшения результатов трансляции телепередач, записанных на цветную кинопленку. Понятно, что в идеале изображение на экране приемника должно выглядеть точно таким же, как если бы передача велась по прямой телецепочке, т.е. без участия кинопленки в этом процессе. Следовательно на вход этапа кодирования передачи при телекинотелепроекции (рис. 23.7) должны подаваться те же сигналы, что и при прямом телевещании. Поскольку и в случае прямого телевещания, и в случае телекинозаписи сцена фиксируется телекамерой, проблема сводится к «извлечению» трихроматических телесигналов из телекинозаписи. В данном случае точное равенство сигналов на входе операции кодирования возможно по крайней мере теоретически.

Если между экспонирующим экранным изображением и спектральными чувствительностями слоев кинопленки не возникает перекрестных помех (иными словами, если свет красного люминофора, модулированный сигналами только «красного» канала телекамеры, воздействует исключительно на красночувствительный слой кинопленки [и аналогично по другим слоям]), то требуемые характеристики электронного маскирования выбираются по точно такому же принципу, что был описан выше. Любые погрешности в этом случае будут возникать только на нелинейных участках характеристических кривых кинопленок (включая межслойные эффекты).

Когда же имеются ощутимые перекрестные помехи, то после логарифмической линеаризации сигналов, помехи эти компенсируются работой схемы электронного матрицирования (см. раздел 19.12). Когда сие невозможно, эффекты перекрестных помех гасят электронным маскированием на стадии экспонирования кинопленки, используя при этом такие световые потоки, спектральные распределения которых эквивалентны спектральному распределению света люминофоров экспонирующей электронно-лучевой трубки (но не применяя при этом фильтров, экспозиционно изолирующих светочувствительные слои киноматериала).

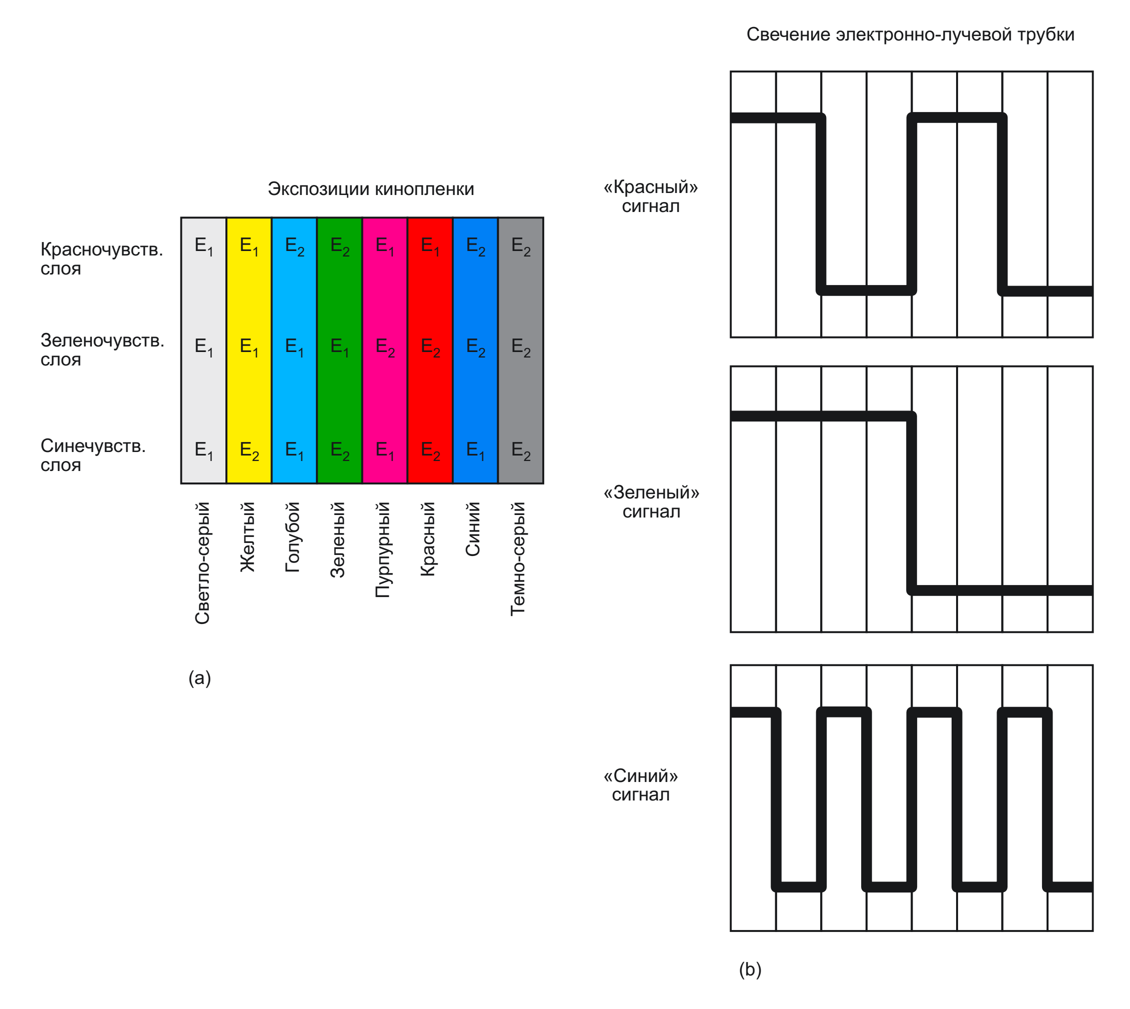


Рис. 23.6 (a) — паттерн, экспонирующий тест-пленку при эмпирическом определении параметров элекронного маскрирования; (b) — визуализация этого паттерна электронного-лучевой трубкой при правильном подборе параметров электроного маскирования.

Важно отметить, что электронное маскирование защищает от перекрестных помех лишь отчасти, поскольку помехи эти ведут не к изменению коэффициентов контрастности слоев, но к их дополнительному экспонированию (т.н. *логарифмический экспозиционный сдвиг*). То есть, электронное маскирование позволяет выполнять прецизионную коррекцию изменений поканальных гамма, но лишь приблизительную коррекцию экспозиционных сдвигов.

23.14 ОБЩИЕ ТРАНСФЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Отношение величины записанного сигнала к величине сигнала от экспонирующего (оптического) изображения часто называют *трансферной характеристикой системы*. Графики изменения этих величин удобно и практично вычерчивать в логарифмических осях, поскольку тангенс угла наклона такого графика будет являть собой ее общую гамма.

Трансферная характеристика типичной телевизионной системы слагается из индивидуальных трансферных характеристик объектива, сенсоров камеры, кода пере-



Рис. 23.7 Сравнение последовательности операций при телетрансляции одной и той же программы, идущей в прямом эфире и записанной кинопленку.

дачи, устройства отображения, а также влияния окружающего освещения на рассматриваемое изображение. Когда имеет место этап кино- или видеозаписи сигналов, то к перечисленному добавляются трансферные характеристики данного носителя, записывающих и считывающих устройств.

23.14.1 Гамма-предыскажение и гамма-компенсация

Даже тогда, когда трансферные характеристики всех узлов телесистемы остаются линейными (в логарифмических осях), благодаря эффектам паразитной подсветки в объективе и других оптических узлах (а также влиянию окружающего освещения на восприятие конечного изображения) результирующая трансферная характеристика системы оказывается нелинейной (Wentworth, 1955). Вместе с тем, отметим, что самоя концепция наклона (гамма) как базового описания общей трансферной характеристики телесистемы, ни коим образом не утрачивает своей ценности.

В свое время было показано, что когда трансферная характеристика системы нелинейна (в логарифмических осях), то наряду с гамма удобно и практично рассматривать такой показатель как *средний градиент* над центральной (1.3) точкой диапазона фотометрических яркостей (соотношение 20:1) (DeMarsh, 1972). Данное понятие будет положено в основу дальнейших рассуждений.

Мы знаем, что сигналы телекамеры подвергаются гамма-предыскажению со степенью 1/2.2. Данное значение, объединяясь с гамма телеприемника 2.8, дает результирующую гамма системы равную 1.25, что необходимо при просмотре телепередач в тусклом окружении (см. раздел 19.13).

Для того, чтобы изображение, полученное с кинопленки, воспринималось точно так же, как полученное от телекамеры (работающей при той же гамма), сигналы, сня-

тые с пленки также должны иметь степень гамма-предыскажения равную 1/2.2 (что эквивалентно 0.45). Однако большинство кинопленок изготавливаются в расчете на проекционный показ в темном помещении, и, как мы знаем, для этих целей требуется эффективная гамма экранного показа равная 1.5 (см. раздел 6.5).

Если эффективная гамма кинопленки при кинотелепроекции равна 1.5, то величина гамма-компенсации в кинотелепроекционном аппарате должна быть равной 1/1.5×0.45 (то есть, 0.3).

Если, однако, при общей гамма системы равной 1.5 (с приемниками на гамма 2.8) возникает необходимость получить результирующую гамма визуализации равную 1.25 (что необходимо для учета окружающего просмотрового освещения — см. раздел 19.13), гамма-предыскажение сигналов телекамеры проводится со значением 0.54 (а не 0.45), в результате чего величина гамма-компенсации при кинотелепроекции становится равной (1/1.5)×0.54, то есть — 0.36. В данном случае, поскольку гамма кинопленки имеет то же значение, что и требуемая гамма системы, величина гамма-компенсации будет равной обратной гамма телеприемника (1/2.8 = 0.36).

В тех случаях, когда гамма монитора равна 2.5, оптимальная величина гамма-компенсации должна быть равной 1/2.5, то есть 0.40 (DeMarsh, 1972; Hunt, 1969).

Опыт свидетельствует, что при гамма приемника 2.8 и эффективной гамма кинопленки 1.5 оптимальная величина гамма-компенсации обычно равна 0.33. Вместе с тем, иногда применяется кинотелепроекция с гамма порядка 0.4, в частности, в сочетании с подстройкой уровня черной точки приемника, дающей несколько меньшую эффективную гамма.

23.14.1.1 Гамма-коррекция при использовании негативных пленок

Когда используется цветная негативная кинопленка (гамма которой обычно равна 0.65), то требуемое гамма-предыскажение в сканере составляет (1/0.65)×0.45, то есть — 0.7 (либо (1/0.65)×0.54 = 0.8) при том допущении, что динамический диапазон всех изображений не выходит за пределы линейного участка характеристической кривой кинопленки.

Очевидные преимущества непосредственного применения негативных кинопленок в кинотелепроекции состоят в следующем:

— объединенная кинонегативнотелепроекционная система управляет тоновой шкалой от высоких светов до глубоких теней с минимальными искажениями, подвергая черную и белую точку изображений минимальной компрессии. Отметим, что высококачественное тоновоспроизведение — залог высококачественного цветовоспроизведения в целом;

— улучшаются т.н. *устойчивость кадра* и его разрешение, поскольку исключается кинокопировальный этап процесса.

Недостатки прямого использования негативной кинопленки заключены в том, что (Wood, Palmer и Griffiths, 1972):

— грязь на пленке проявляет себя в виде белого крапа, который гораздо заметнее черных пятнышек грязи на позитивной пленке;

— если используется оригинальный негатив, т.е. тот, на который велась съемка, то зоны склейки могут оказаться весьма заметными, и, плюс к тому, растет вероятность разрыва пленки;

— высокий риск повреждения оригинального материала;

— негативная пленка может использоваться только тогда, когда кинопродюсер и продюсер телепередачи — одно лицо.

23.14.1.2 Гамма-коррекция при использовании датчиков бегущего луча и CCD-сенсоров

Когда для кинотелепроекции применяются датчики бегущего луча или CCD-сенсоры (см. разделы 23.9 и 23.10), то гамма-компенсация (0.33, 0.4, 0.7 или 0.8) должна проводиться при помощи соответствующих электронных схем. Однако если для кинотелепроекции используется камера телевизионного типа (см. раздел 23.7), то общая гамма-коррекция частично реализуется за счет нелинейности передающих трубок: к примеру, видикон имеет гамма порядка 0.6 и, следовательно, в этом случае электронная схема гамма-коррекции для получения результирующих 0.33, 0.4, 0.7 и 0.8 должна давать значения гамма равные 0.55, 0.7, 1.2 и 1.3 соответственно.

23.14.1.3 Гамма-коррекция при паразитной подсветке

Снижение коэффициента контрастности (гамма), вызванное паразитной подсветкой, может привести к тому, что изображения, полученные с кинопленки, будут восприниматься «мутненькими» и с ощутимо осветленной черной точкой (особенно в мелких деталях).

Разумеется, были разработаны методы компенсации этих эффектов, в частности такие как:

— добавка сигналов негативного изображения низкого разрешения к сигналам позитивного изображения высокого разрешения, выполняемая путем электронного микширования;

— усиление контрастности пространственно малых областей изображения (усиление микроконтрастов), выполняемое *после* гамма-компенсации его крупных областей (Palmer, 1969).

23.14.2 Экспертная оценка

При любой критической оценке контрастности изображения важно помнить, что установ уровня черной точки («Яркость») телеприемника может оказать радикальное влияние на конечный результат. Стандартный уровень черной точки обычно определяется фотометрической яркостью электронно-лучевой трубки на точке гашения, то есть при начальном уровне входного сигнала. Найти этот уровень помогает специальное устройство — т.н. *генератор настройки видеомониторов* (*PLUGE — Picture Line-Up Generating Equipment*), дающий сигналы, мощность которых лежит возле начального уровня входного сигнала (Quinn и Siocos, 1967).

Мы помним, что интенсивность внешнего света, падающего на экран дисплея, радикально влияет на гамма тонопередачи, а от фотометрической яркости окружения телепросмотра зависит визуальная контрастность изображения (см. раздел 6.5). Однако оба эффекта обычно самокомпенсируемы, поскольку окружение высокой фотометрической яркости как правило сопровождается высоким уровнем окружающего освещения, удачно снижающим гамма телепоказа с 1.5 (для темного окружения) до 1.25 (для тусклого), и даже подчас до 1.0 (что требуется тогда, когда фотометрическая яркость окружения примерно равна средней фотометрической яркости изображения) (Novick, 1969).

Отметим также, что просмотровые условия экспертной оценки телеизображений не должны сильно отличаться от заурядных условий домашнего телепросмотра.

23.15 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Как было показано в разделе 23.12, качество кинофильмов, которое воспринимается практически идеальным при проекционном показе в затемненном помещении, из-за неверного или вариабельного хроматического баланса при демонстрации этого фильма по телевидению может снизиться до неприемлемого уровня. Так происходит потому, что при типичном телевизионном просмотре адаптирующая роль цветного изображения существенно меньше, чем при просмотре проекционном. Поэтому, при экспертной оценке кинофильма, ориентированного на телепоказ, контрольный проекционный просмотр должен проводиться при освещенном окружении, дабы наблюдатель был более требователен к хроматическому балансу изображения.

Точные параметры экспертных проекционных условий таковы (Harrop, 1970; Knight, 1972):

— коррелированная цветовая температура лампы проектора и подсветки окружения — 5400 К;

— фотометрическая яркость экрана при пустом кадровом окне порядка 140 кд/м^2, что дает порядка 70 кд/м^2 по белой точке изображений (за счет вуали кинопленки — *Прим. пер.*);

— фотометрическая яркость окружения должна быть равна примерно 1/3 от фотометрической яркости белой точки;

— площадь окружения минимум в 9 раз больше площади изображения.

Было показано, что для оптимизации телевизионного показа кинофильмов, последние должны точно соответствовать принятым стандартам (British Standard 4563; 1970), в частности: в изображении не должно быть деталей с оптической плотностью ниже 0.3, но, в то же время оптическая плотность участков изображения, воспроизводящих чистый белый, не должна превышать 0.4. Оптическая плотность глубоких теней, в которых критична деталировка, не должна превышать 2.0, при этом крупные черные участки должны иметь оптическую плотность порядка 2.5 и выше (Zwick, 1971).

Хроматический баланс изображений должен быть таким, чтобы элементы изображения, призванные выглядеть нейтрально-серыми, при освещении кинопленки источником света с относительным спектральным распределением планковского черного тела при коррелированной цветовой температуре 5400±400К, были метамерно равны манселловским немаркированным серым образцам при том же освещении для Стандартного двухградусного колориметрического наблюдателя CIE.

Было показано, что кинопленки, отвечающие данному стандарту, демонстрируют высокое качество при проекционном показе, но не наоборот, к примеру: изображения, которые воспринимаются идеальными по качеству при проекционном показе в свете лампы накаливания, при телепросмотре могут приобрести выраженный сдвиг хроматического баланса в синюю сторону (Zwick и Brothers, 1970).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Anderson, C.E., and Roizen, J., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 68, 667 (1959).

Beiser, L., Lavender, W., McMann, R.H., and Walker, R., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 80, 699 (1971).

Brewer, W.L., Ladd, J.H., and Pinney, J.E., Proc. Inst. Radio Engnrs., 42, 174 (1954).

British Standard 4563: 1970, The Density Range, Contrast and Colour Balance of Films and Slides for Colour Television (1970).
Brown, I., Brit. Kinematog. Sound Tel., 52, 253 (1970).
Burr, R.P., Proc. I.R.E., 42, 192 (1954).
Caddigan, J.L., and Goldsmith, T.T., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 65, 7 (1956).
Childs, I., and Sanders, J.R., Brit. Kinematog. Sound Tel., 60, 318 (1978).
Childs, I., and Sanders, J.R., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 89, 100 (1980).
Comandini, P., and Roth, T., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 87, 82 (1978).
Corbett, J., Brit. J. Phot., 116, 122 (1969).
DeMarsh, L.E., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 81, 784 (1972).
Evans, R.M., Hanson, W.T., and Brewer, W.L., Principles of Color Photography, p. 504, Wiley, New York (1953).
Godden, W.R., Brit. Kinematog. Sound Tel., 57, 442 (1975).
Godden, W.R., Proceedings of the Montreux Television Conference, paper 5h (1977).
Harrop, L.C., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 79, 806 (1970).
Hayer, L., and Verbrugghe, R., Brit. Kinematog. Sound Tel., 54, 324 (1972).
Hunt, R.W.G., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 268 (1969).
Hunt, R.W.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 87, 78 (1978).
Journal of the Royal Television Society, J. Roy. Television Soc., 16, 24 (1976).
Kitson, D.J.M., Palmer, A.B., Spencer, R.H., Sanders, J.R., and Weston, M., I.E.E. Conference Proceedings No. 88, p. 237 (1972).
Knight, R.E., Brit. Kinematog. Sound Tel., 52, 248 (1970).
Knight, R.E., Brit. Kinematog. Sound Tel., 54, 234 (1972).
Lisk, K.G., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 88, 157 (1979).
Lisk, K.G., and Evans, C.H., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 80, 801 (1971).
Lisk, K.G., and Evans, C.H., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 82, 719 (1973).
Marsden, R.P., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 87, 73 (1978).
Mulliner, J., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 393 (1969).
Novick, S.B., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 342 (1969).
Palmer, A.B., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 428 (1969).
Pay, D.A., I.E.E. Conference Proceedings No. 69, p. 141 (1970).
Poetsch, D., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 87, 815 (1978).
Pullinger, A.E.H., and Reeves, R.F.J., I.E.E. Conference Publication No. 69, p. 272 (1970).
Quinn, S.F., and Siocos, C.A., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 76, 925 (1967).
Spooner, A.M., Pryke, G.A., and Gardiner, A.V., J. Roy. Television Soc., 12, 17 (1968).
Staes K., Brit. Kinematog. Sound Tel., 59, 354 (1977).
Swan, D., J. Roy. Television Soc., 15, 206 (1974).
Swinson, P.R., Image Technology, 71, 432 (1989).
Taylor, D.M., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 74, 930 (1965).
Venis, R.J., Brit. Kinematog. Sound Tel., 51, 379 (1969).
Wayne, P., J. Roy. Television Soc., 14, 178 (1973).
Wentworth, J.W., Color Television Engineering, p. 156, McGraw Hill, New York (1955).
Wheeler, L. J., Principles of Cinematography, 4th Edn., P. 67, Fountain Press, London (1969).
Whitehead, R. C., Principles of Television Engineering, Vol. 2, p.15, Iliffe, London (1965).
Wood, C. B. B., and Griffiths, F. A., Brit. Kinematog. Sound Tel., 48, 74 (1966).
Wood, C. B. B., Palmer, A. B., and Griffiths, F. A., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 81, 661 (1972).
Wood, C. B. B., Sanders, J. R., and Griffiths, F. A., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 74, 755 (1965).

Zwick, D. M., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 80, 88 (1971).
Zwick, D. M., and Brothers, D. L., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 79, 31 (1970).

ЛИТЕРАТУРА

Griffiths, L. H., and Sanders, J. R., Brit. Kinematog. Sound Tel., 56, 262 (1974).
Gunderson, K. E., Brit. Kinematog. Sound Tel., 53, 336 (1971).
Palmer, A. B., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 74, 1069 (1965) .
Ross, R. J., Colour Film for Colour Television, Focal Press, London (1970).

24 ВИДЕОНОСИТЕЛИ

24.1 ВВЕДЕНИЕ

Звуковоспроизводящие устройства (радиоприемники и граммофоны), позволявшие прослушивать, соответственно радиопередачи и студийные грамзаписи, появились задолго до бытовых звукозаписывающих устройств. У любительского кинематографа история несколько иная: вначале были придуманы кинокамеры, пленки и проекторы. Широковещательное телевидение появилось много позже, а технология записи телеизображений и передачи их в эфир — это сравнительно недавнее изобретение. Развитие последнего шло по двум направлениям:

— были созданы устройства, способные не только воспроизводить, но и *записывать* материал, передавая затем записанное в эфир. То есть были разработаны т.н. *видеомагнитофоны* (*video tape recorder — VTR*), использовавшие магнитную ленту и позволявшие производить запись в том числе с электронных камер. Видеомагнитофоны долгое время применялись и в широковещательном телевидении с целью записи программ задолго до их передачи в эфир.

— для домашнего просмотра (и только просмотра) студийно записанных передач и кинофильмов были разработаны несколько вариантов *дисковых технологий*, позволяющих тиражировать видеопрограммы гораздо быстрее и дешевле, чем на магнитной пленке.

Итак, ниже мы рассмотрим оба направления технологии записи, хранения и визуализации видеоинформации: технологию *видеокассет* и технологию *видеодисков*.

24.2 МАГНИТНАЯ ЛЕНТА

24.2.1 Общий принцип

Принцип записи данных на магнитную ленту показан на рис. 24.1: электрические токи, модулированные записываемой информацией, идут через катушки, в которых расположены металлические сердечники, изготовленные из легко намагничиваемого материала (т.е. обладающего низкой остаточной намагниченностью и высокой проводимостью) — ферритовых или железных пластин. Токи создают в сердечниках магнитные поля и, благодаря тому, что сердечники образуют окружность с двумя маленькими воздушными зазорами, магнитное поле «разбухает» в пространстве возле этих зазоров. Лента проходит вплотную к одному из последних, благодаря чему магнитное поле проникает в ее толщу.

Магнитная лента, как правило состоит из майларовой (телиреновой) подложки толщиной порядка 0.025 мм, покрытой игольчатыми микрокристаллами оксида железа (Fe_2O_3) или диоксида хрома (CrO_2), диспергированными в клеящей массе толщиной от 0.005 до 0.02 мм. Кристаллы могут намагничиваться и удерживать бóльшую часть намагниченности после прекращения действия магнитного поля. Таким образом, когда лента протягивается почти вплотную к воздушному промежутку между сердечниками, запись образуется благодаря действию магнитного поля, и, коль скоро токи в катушках меняются во времени, характер намагниченности ленты меняется с расстоянием.

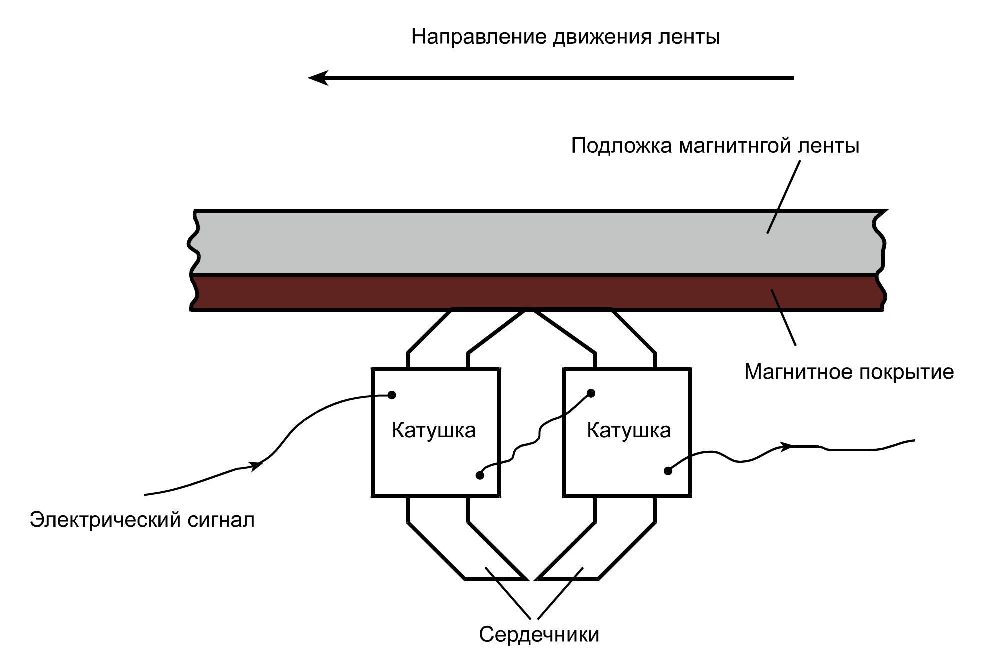


Рис. 24.1 Принцип записи информации на магнитную ленту (схематично).

При считывании записанной информации лента проходит вплотную к аналогичному (или тому же самому) воздушному зазору, но процесс теперь идет в обратном направлении: магнитные поля ленты инициируют изменения магнитного поля в этом зазоре, что, в свою очередь, вызывает электрические токи в катушках. Токи эти усиливаются и используются для воспроизведения звуковых и/или зрительных стимулов. Наконец отметим, что катушка, сердечники и воздушный зазор в совокупности представляют собой т.н. *головку* видеомагнитофона.

24.2.2 Запись аудиосигналов

В звукозаписи обычно используется лента шириной 6.35 мм: пишутся две дорожки шириной 2.3 мм с защитной полоской между ними шириной 1.3 мм. Альтернативно: на ленту наносятся четыре узких дорожки, в результате чего на одной ленте умещаются две стереозаписи. Иногда на одну ленту пишут даже восемь дорожек.

Максимальная частота сигнала, который может быть зафиксирован на магнитной пленке, примерно равна половине цикла на воздушный зазор. Типичный зазор равен 0.0025 мм, хотя у специальных головок он может составлять 0.00125 мм и менее. То есть, максимальные частоты фиксируемых сигналов составляют:

— примерно 37.5 кГц при скорости протяжки ленты 19 см/с;

— 19 кГц при скорости протяжки ленты 9.5 см/с;

— 9 кГц при 4.75 см/с.

Однако, на частотах, близких к максимуму, возникают прогрессивные потери мощности сигналов, поэтому высококачественная звукозапись (частоты которой доходят до 15 кГц) требует скорости протяжки ленты 19 см/с. Вместе с тем, вполне сносное качество звучания можно получить и при 4.75 см/с.

Отметим, что на пленку записывается информация не об одних лишь звуковых стимулах, но одновременно проводится т.н. *высокочастотное подмагничивание*, повышающее чувствительность системы и максимум неискаженного выходного сигнала.

Стирание записи выполняется за счет приложения к ней сильного высокочастотного (ультразвукового) сигнала от отдельной головки с широким воздушным зазором.

24.2.3 Запись видеосигналов

При записи информации о телевизионных изображениях максимум частот фиксируемых сигналов доходит до 5 МГц, и, следовательно, скорость протяжки пленки в данном случае должна быть в 300 раз выше, чем при звукозаписи. Такая высокая скорость (порядка 3000 см/с) априори ведет к крайней непрактичности обычных линейных систем (т.е. подобных звукозаписывающим): длина ленты, необходимая для записи полноценной телепрограммы, должна в этом случае быть огромной, и, следовательно, стоимость системы — чрезмерной; плюс к тому из-за всасывания воздуха между лентой и лентопротяжным механизмом неизбежно возникнут сложности с обеспечением заданной скорости протяжки.

По описанным причинам высококачественная видеозапись, предназначенная для широкого телевещания, обычно выполняется с помощью т.н. *многоголовочных поперечно-строчных систем*, пишущих дорожки так, как показано на рис. 24.2.

Ширина магнитной ленты в видеомагнитофонах поперечно-строчного типа обычно составляет 51 мм, а скорость протяжки — 38 см/с (иногда 19 см/с). За счет специальных направляющих с вакуумными пазами, магнитная лента движется по кривой с радиусом порядка 25 мм. Запись/считывание информации производится в направлении поперечном движению ленты четырьмя записывающими/воспроизводящими головками, вращающимися со скоростью:

— 24 об/с у 60 герцовых систем;

— 25 об/с — у 50 герцовых.

Несмотря на то, что пленка протягивается со скоростью всего лишь 38 см/с, фактическая скорость записи/воспроизведения много больше и составляет 3800 см/с. В итоге, каждый телевизионный полукадр фиксируется:

— у 60 герцовых систем — на шестнадцати смежных поперечных дорожках;

— 50 герцовых — на двенадцати.

Следовательно, крайне важно, чтобы информация с каждой дорожки считывалась с минимумом временных погрешностей.

Сигналы пишутся частотно-модулированными на 8 мегагерцовой несущей с полным размахом колебания примерно от 7 до 9 МГц и с боковыми полосами, дающими частоты в диапазоне от 1.5 МГц до 14.5 МГц (Tooms, 1970). Заметим, что максимальная частота в 14.5 МГц соответствует длине пространственной волны на ленте 0.0025 мм.

Описанная технология была разработана в 1956 г. американской компанией Ampex Corporation[1] и предназначалась для записи черно-белых телепередач (Ginsburg, 1957), а в 1959 г. ею же была предложена технология записи трихроматических телесигналов (Anderson и Roizen, 1959). До самого недавнего времени система Ampex активно использовалась в широковещательном телевидении стандартов NTSC, PAL и SECAM (Machein, 1959).

Наконец отметим, что телепрограммы, записанные в одной системе, могли исполь-

---

[1] Фирма Ampex основана в 1944 году в Калифорнии *Александром Матвеевичем Понятовым*. Звание полковника царской армии давало право принимать обращение «Ваше Превосходительство» — по-английски excellence. AMPex = A.M.Poniatoff Excellence. Весной 1956 года состоялась презентация первого видеомагнитофона с вращающимися головками VRX-1000. — *Прим. пер.*

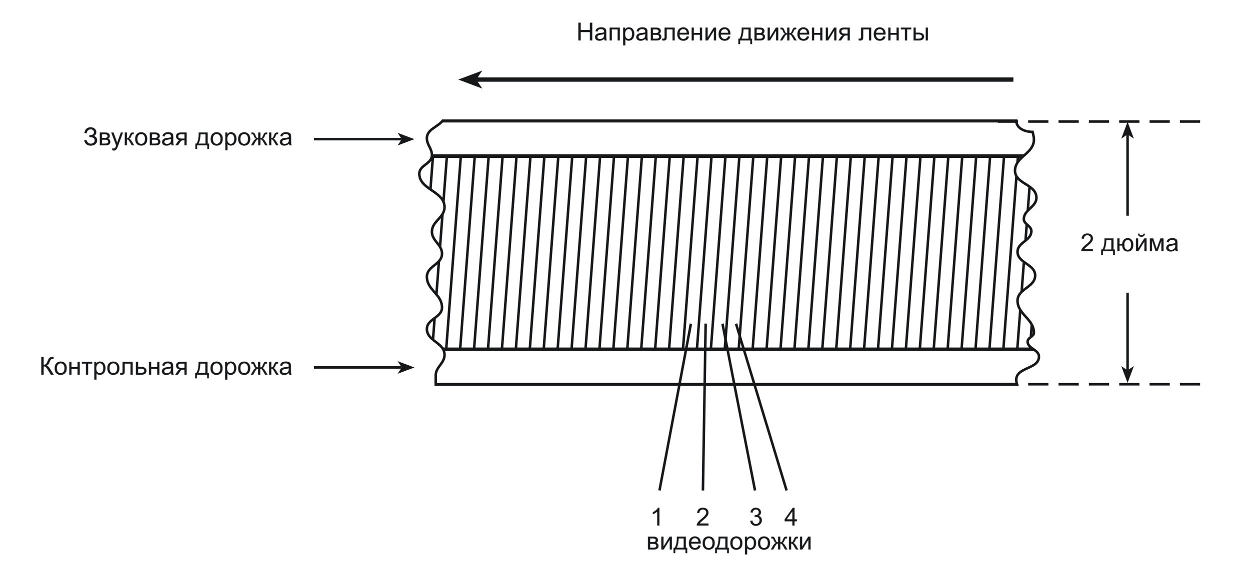


Рис. 24.2 Расположение дорожек на поперечнострочной видеоленте четырехголовочных видеомагнитофонов, применявшихся в широковещательном телевидении.

зоваться другой системой только при наличии специального конвертера сигналов (Baldwin, Stalley и Kitchin, 1972).

24.3 МАГНИТНАЯ ЛЕНТА СПИРАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКИ

Для записи и воспроизведения видеоизображений четырьмя головками, смещающимися относительно магнитной ленты (см. предыдущий раздел), требуется высокая прецизионность ее протяжки, а также минимальный разнос технологических параметров головок. Однако требования слабеют, когда каждая поперечная дорожка несет на себе информацию о полном телевизионном полукадре (а не только о его фрагменте). В данном контексте попытки увеличения ширины магнитной ленты в несколько раз оказались нетехнологичны, плюс к тому, применение единичной головки требовало того, чтобы пленка была изогнута в форме цилиндра, дабы при смене полукадров головка за время обратного хода пучка успевала проходить от конца одной дорожки до начала следующей.

Изящным выходом из положения явилось применение принципа т.н. *спиральной развертки*: в одной из систем магнитная лента опутывала некий барабан, образуя один виток спирали (рис. 24.3 [а]). Уклон спирали был таким, что пленка имела боковое смещение примерно равное ее ширине. Единичная головка вращалась в круглом щелевом пазу барабана. Паз позиционировался так, что головка начинала работу возле одного края ленты и заканчивала ее у противоположного края. После того, как головка делала полный оборот, она вновь попадала на первый край ленты, но к тому времени пленка успевала сместиться, и работа головки начиналась с новой дорожки. Понятно, что для реализации данной конструкции дорожки на ленте должны были располагаться наклонно — рис. 24.4.

Скорость вращения головки была подобрана так, чтобы в точности соответствовать периоду телевизионного полукадра, т.е. каждая дорожка несла на себе информацию об одном полном полукадре. Следовательно, в сравнении с четырехголовочными системами, в которых каждый полукадр пишется на 16-ти дорожках (у 60 герцовых систем) или

ТАБЛИЦА 24. Форматы высококачественной видеозаписи

Система	Ширина ленты	Количество головок	Скорость протягивания пленки	Расположение дорожек	Прим.
Ampex	2 дюйма	4	15 дюйм/с (38 см/с) 7,5 дюйм/с (19 см/с)	Поперечное	Разработана для высококачественного телевещания
International Video Corporation	2 дюйма	2	8 дюйм/с (20,3 см/с)	Спиральное	Разработана для высококачественного телевещания
International Video Corporation	1 дюйм	1	6,73 дюйм/с (17,1 см/с)	Спиральное	
Victor Company of Japan and Matsushita	3/4 дюйма	2	3,75 дюйм/с (9,53 см/с)	Спиральное	
Sony U-matic	3/4 дюйма	2	3,75 дюйм/с 9,53 см/с	Спиральное	

12-ти (у 50 герцовых), каждая спиральная дорожка должна была нести в себе тот же объем информации, что и с четырех (или пяти) дорожек четырехголовочной системы.

Если окружность спирали достаточно велика, т.н. *плотность записи* на дорожку можно понизить, упростив тем самым технологию изготовления головки. Плюс к тому, чем меньше наклон дорожек, то есть, чем меньше угол между дорожкой и краем ленты, тем больше может быть скорость движения ленты, что позволяет уйти от паразитного перехлеста соседних дорожек.

Альтернативой технологии одноголовочных систем явилось применение системы двухголовочной, ограничивавшей оборот ленты половиной длины окружности головки (см. рис. 24.3 [b]). В данном случае каждая дорожка по-прежнему соответствовала одному полукадру, но, несмотря на то, что приходилось конструкционно согласовывать работу двух головок, конфигурация ленты оказывалась намного удобней (благодаря чему двухголовочные системы очень популярны).

Одним из очевидных преимуществ систем спиральной развертки являлось то, что при неподвижной ленте удавалось воспроизвести статичное изображение с двух соседних дорожек, однако плавное движение от одной дорожки к другой снижает его качество особенно в срединных строках.

В таблице 24.1 даны форматы видеозаписи, применявшиеся в высококачественном

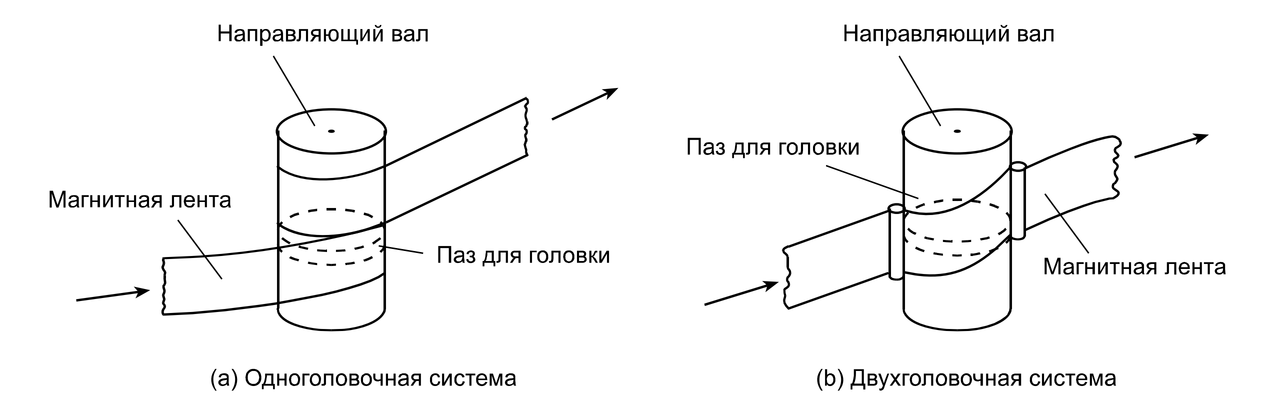


Рис. 24.3 Спиральная развертка при записи на магнитную ленту: (a) — при одной головке; (b) — при двух головках.

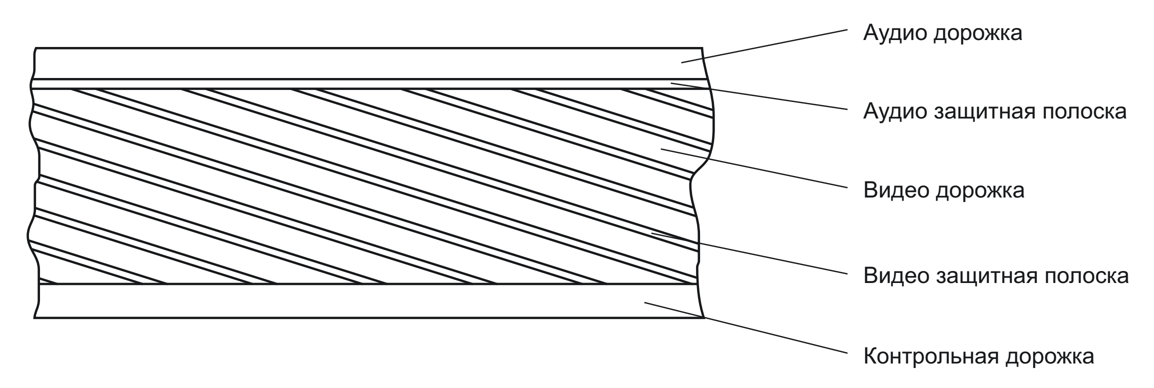


Рис. 24.4 Типичной расположение дорожек в системах спиральной развертки.

телевизионном вещании, а также полупрофессиональные и промышленные форматы, использовавшие ленту шириной 3/4 дюйма (Reynolds, 1970; Sawagaki, Yagi, Iwasaki, Inada и Tamaoki, 1960; Millard, Guisinger и Roizen, 1972; Ross, 1974). Отметим, что в бытовых аппаратах, с целью их максимального удешевления, широко применялась лента в 1/2 дюйма.

24.3.1 VHS

По завершении периода острой конкуренции между системами *Sony Beta, Philips V2000 и VHS* (*Video Home System*), разработанной Matsushita[1] и Victor Company of Japan[2] (JVC), последняя была повсеместно принята как система, предназначенная для домашней видеозаписи и воспроизведения.

---

[1] Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. — японская компания, один из крупнейших в мире производителей бытовой электроники. Штаб-квартира — в г. Кадома префектуры Осака (Япония). Основана в 1918. В компанию входит 638 предприятий. — *Прим. пер.*

[2] JVC (Victor Company of Japan, Limited) — японская компания, производитель бытовой видеотехники. Штаб-квартира — в Иокогаме. Основана в 1927 году. С середины 60-х годов контрольный пакет принадлежит компании Matsushita (владельцу торговой марки Panasonic). — *Прим. пер.*

VHS использовала спиральную развертку и две головки. Магнитная лента была заключена в кассету, благодаря чему легко загружалась в видеомагнитофон (и также легко выгружалась из него). Плюс к тому, пленка была надежно защищена от механических повреждений, но при этом недоступна пользователю. Система в целом справлялась с воспроизведением статичных изображений и неплохо воспроизводила движение на перемотке.

VHS и ее *компакт-версия VHSC* (C — compact) оказались вполне применимыми в камкордерах (см. раздел 20.14), однако стремление к еще большей компактности привело в свое время к появлению и массовому распространению 8 мм формата, размер кассет которого почти такой же как и у аудиокассет.

Спустя время для повышения качества VHS-изображений была разработана *hiband*-версия[1] всех трех форматов (поименованных, соответственно, как: *SVHS, SVHSC* (S — super) и *Hi8*), в которой применялась лента повышенного качества, а запись яркостного сигнала и цветоразностных сигналов велась раздельно. Hiband-системы давали до 400 горизонтальных полос (против 200 у VHS). Все SVHS-камкордеры могли воспроизводить собственную запись на телеприемниках «своей» системы, но чтобы реализовать все преимущества hiband-записи требовался телеприемник с S-Video-входом.

Время записи на одной кассете у всех систем достигало 4 часов (и несколько меньше у систем VHSC и SVHSC).

Звук в описанных системах записывался по-разному, в разных форматах, и, даже в рамках одной системы, разные модели камкордеров могли использовать разные варианты звукозаписи.

24.4 ВИДЕОДИСКИ

Успехи массовой дисковой звукозаписи подтолкнули исследователей к разработке *видеодисков*: в самом деле, диск дает возможность в любой момент получить незамедлительный доступ к отснятому материалу, тогда как поиск нужного места на ленте требовал ее перемотки, подчас длительной. Иными словами, быстрота доступа к информации — важнейшее преимущество дисков.

Одно время выпускались диски с магнитным покрытием с обеих сторон: запись велась по тем же принципам, что и на магнитную ленту, но применялись также и иные методы.

Для разных целей использовались диски разного диаметра: от 12 до 2 дюймов.

Нетрудно догадаться, что в контексте видеозаписи основной технической проблемой являлась разработка технологии сохранения гораздо большего количества информации, чем того требовала аудиотехнология.

Как было показано в разделе 24.2, для записи сигналов с максимальными частотами порядка 15 кГц необходимо обеспечить 15000 т.н. *опросов в секунду*, при этом чтобы зафиксировать 1000 сигналов, различимых по амплитуде, требуется 10 бит информации ($2^{10} = 1024$). Таким образом, максимальный требуемый битрейт аудиозаписи составляет всего лишь 15000×10 — то есть 0.15 Мбит/с.

При видеозаписи топовые частоты составляют порядка 5 МГц, что требует обеспечения 5×10^6 опросов в секунду. Для обеспечения 256 тональных градаций разрядность

1 «Hiband» в данном контексте означает «широкополосный». — *Прим. пер.*

кодирования должна составлять 8 бит ($2^8 = 256$), то есть, требуемый битрейт достигает $5\times10^6\times8 = 40$ Мбит/с, что в 270 раз больше, чем при звукозаписи.

Стандартная граммофонная запись со скоростью 33.3 об/мин вмещала 5000 бит/мм^2 (в сравнении с 1000 бит/мм^2 у магнитной записи), тогда как видеозапись на диски требовала информационной емкости порядка 1.3 млн. бит/мм^2; однако даже половинное ее значение оказывалось вполне адекватным, если уровень качества был несколько ниже типичного уровня качества изображений в широковещательном телевидении (что вполне приемлемо для дисковой видеозаписи).

24.5 TELDEC-СИСТЕМА

В системе *Teldec* (совместная разработка немецкой компанией A.E.G. Telefunken и британской компании Decca), зафиксированный сигнал представлял собой колебание глубины специальной винтовой канавки, составлявшее порядка ±0.5 μm (Gilbert, 1970; Dickopp, 1971; Redlich, 1971). Трихроматические сигналы записывались по очереди на последовательных строках (Bruch, 1967; Bruch, 1972).

24.6 КАНАВОЧНЫЕ ДИСКИ

Диски, совместно разработанные американской компанией RCA и японскими компаниями JVC и Matsushita, несли на себе видеоинформацию, записанную также в виде колебаний глубины винтовой канавки. Одна из наиболее популярных версий такой системы именовалась *Selectavision*.

24.7 ЛАЗЕРНЫЕ ДИСКИ

24.7.1 Laservision

Особо малый диаметр сечения лазерного луча позволил использовать последний для сверхплотной записи видеоинформации (и, разумеется, для ее считывания). В системе *Laservision*, разработанной голландским филиалом компании Philips (позднейшие версии — плод совместных разработок Philips и MCA [США]), вначале записывался специальный мастер-диск. Сигналы, несущие видеоинформацию, модулировали интенсивность лазерного луча, сфокусированного на фотопластине и вращавшегося по спиральной траектории. Амплитуда сигналов была «подрезана» примерно до трети от обычного максимума. Вариации частоты импульсного сигнала несли яркостную информацию, а вариации длины импульсов — цветоразностную (рис. 24.5).

На следующем технологическом этапе фотозапись протравливалась, и в мастер-диске образовывалась серия ямок. Затем с мастер-диска изготавливалось никелевое клише, которое, в свою очередь прессовало собственно пластиковые аудио диски.

Диски вращались со скоростями либо 1500 об/мин (у 50 герцовых систем), либо 1800 об/мин (у 60 герцовых), давая одно полное телевизионное изображение (два полукадра) на оборот. При этом стоит отметить, что низкие скорости могли использоваться и для увеличения времени проигрывания.

Длина ямок на мастер-диске варьировала от 0.6 до 0.4 μm, ширина была порядка 0.7 μm, а глубина — 1 μm. Яркостный сигнал, ширина полосы которого составляла порядка 4.75 МГц, модулировался по частоте; цветоразностные сигналы, а также звуковой сигнал, ширина полос которых составляла около 1 МГц у цветоразностных и 0.25

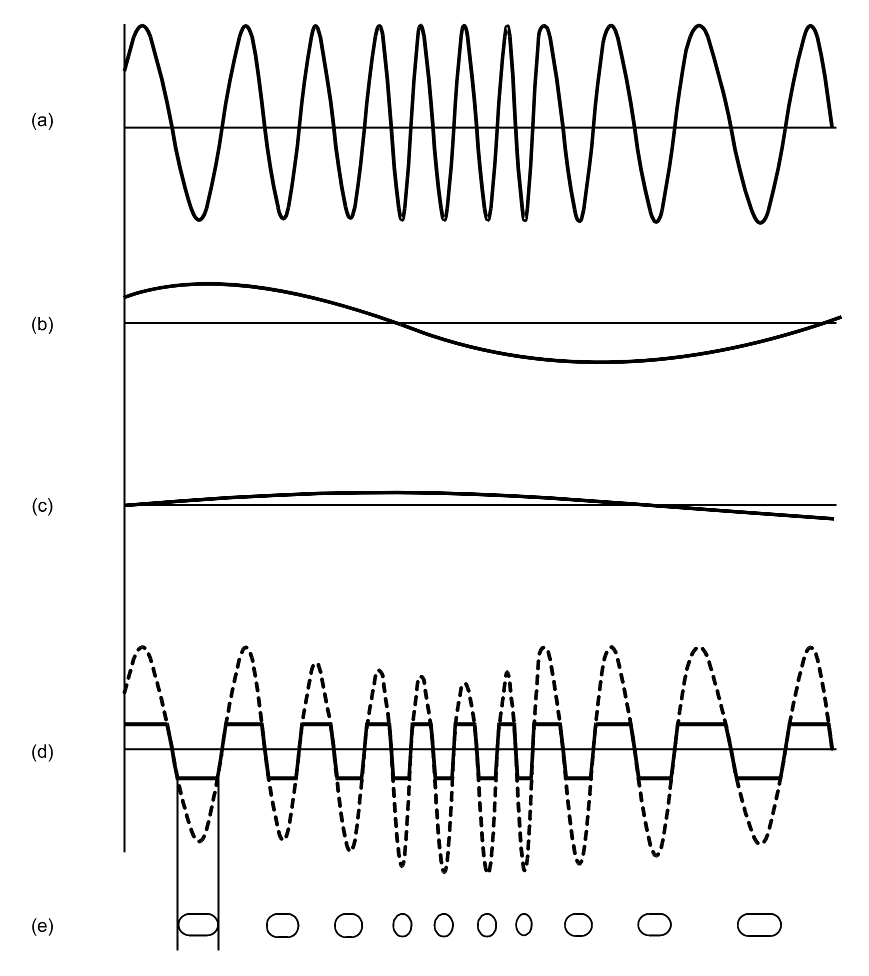


Рис. 24.5 Метод записи сигналов в системе «Philips Laser disc».
(a) Частотно-модулированный яркостный сигнал;
(b) Амплитудно-модулированные цветоразностные сигналы;
(c) Амплитудно-модулированный аудио сигнал.
(d) Объединенный сигнал с урезанной амплитудой, дающий импульсы, частота которых несет информацию о яркости стимулов, а длина — об их цветности, а также стимулах звуковых.
(e) Паттерн кодирующих ямок.

МГц у аудиосигналов — по амплитуде. Яркостный сигнал занимал полосу высших частот, звуковой сигнал — низших. При этом технология перенасыщения полосы не применялась (Kramer и Compaan, 1974).

Воспроизведение изображений с диска осуществлялось с помощью другого лазера, луч которого фокусировался на спиральной дорожке копии. Свет, отраженный от диска и модулированный дифракцией в ямках, падал на фотоэлемент, выдававший требуемые электрические сигналы.

Для того, чтобы обеспечить время проигрывания одного диска порядка 30 мин, шаг между соседними витками спиральной дорожки был доведен до 2 μm, что потребовало прецизионной фокусировки лазерного луча на дорожке диска. Последнее достигалось: по вертикальному направлению — за счет сервопривода к объективу микроскопа (фокусирующего лазерный луч); по радиальному — за счет специальных сервозеркал,

получавших сигналы от двух дополнительных световых точек (одной, смещенной вперед, другой — слегка назад от центра диска).

Главным недостатком Laservision (равно как и систем Teldec и Selectavision, обсуждавшихся выше) являлось то, что они могли использоваться только с целью воспроизведения и не были способны *записывать* материал из телеэфира или с помощью видеокамер (именно по этой причине были весьма популярны пишущие видеомагнитофоны, т.е. способные не только к воспроизведению, но и к записи). Однако же, система Laservision была повсеместно принята в качестве стандарта высококачественной долгоиграющей аудиозаписи на *компакт-диски* (*CD*).

Со временем диаметр компакт-диска уменьшился с 12 дюймов до 4.75 дюйма (120 мм); время проигрывания нецифровой аудиозаписи при этом составило 72 мин.

Стоит сказать, что компакт-диски могут использоваться для хранения любой информации, представленной в цифровой форме и, разумеется, до самого недавнего времени в качестве носителей информации они находили широчайшее применение в компьютерной технике. Такие диски получили название *CD-ROM* (*Compact Disk Read-Only Memory*), что значит «компакт-диск, предназначенный только для чтения» (или *CDR* — Constant Density Recording — «диск для записи данных с постоянной плотностью»).

Понятно, что CD можно изготовить *интерактивным*, и в этом случае он будет именоваться *CD-I* (Compact Disc Interactive).[1]

CD-ROM- и CD-I-диски могут использоваться для хранения текстов, фотографий, кинофильмов и звуковых дорожек.

24.7.2 DVD-диски

Следующим этапом в эволюции компакт-дисков явилось появление *DVD-формата,* что означает: *Digital Versatile Disks* — формат *цифровых многофункциональных дисков,* емкость которых, благодаря меньшему диаметру ямок и более плотной паковке последних, в семь раз превысила емкость обычных компакт-дисков.

В своем простейшем виде — т.н. *SSSL-варианте* (Single Sided Single Layer — односторонний диск с одним слоем), DVD-диск представляет собой «бутерброд» из двух пластиковых субдисков толщиной 0.6 мм каждый. Субдиски имеют разную химическую структуру и плотно склеены вместе. Первый субдиск несет на себе информацию, закодированную в виде ямок и покрыт тончайшим слоем алюминиевого напыления. Поверх напыления располагается второй субдиск.

Второй вариант DVD-дисков — *DSSL* (Double Sided Single Layer — двухсторонний диск с одним слоем). В данном случае второй диск тоже покрыт алюминизированными ямками, несущими информацию. Для того, чтобы прочитать последнюю, диск нужно перевернуть.

Третий вариант — *SSDL* (Single Sided Dual Layer — односторонний диск с двумя слоями). Запись и воспроизведение ведется на одной стороне за счет применения полупрозрачного слоя золота или силикона (вместо алюминия).

Четвертый вариант — *DSDL* (Double Sided Dual Layer — двухсторонний диск с дву-

---

[1] Формат лазерных дисков, предназначенных для хранения на одном диске интегрированных данных (например, движущегося видео-, аудио- и отдельных изображений), разработанный компанией Philips в 1988 г. Совместим с форматом High Sierra, но с дополнениями. Модификация - CD-I Bridge. — *Прим. пер.*

мя слоями) задействует как полупрозрачный, так и алюминиевый тип записи, благодаря чему при двухстороннем использовании емкость растет вдвое в сравнении с SSDL.

Пятый вариант — *DSML* (Double Sided Mixed Layer — двухсторонний диск с комбинированными слоями) задействует три потока записи: два ведутся на одном носителе, один — на другом.

DVD-диски бывают двух диаметров: 80 мм и 120 мм. Полезная информационная емкость 80 миллиметрового SSSL-диска составляет 1.46 гигабайта[1] (класс DVD-1). Емкость 120 мм диска DSDL составляет 17.08 гигабайт (класс DVD-18). За счет применения т.н. MPEG-компрессии сигналов (см. разделы 19.16 и 30.10) каждый слой DVD-диска способен нести видеосигналы на 2 часа проигрывания.

Наконец отметим, что когда в слои некоторых дисков (получивших названия *CD-RW* и *DVD-RW*)[2] вводятся *полимерные органические красители* или *материалы с фазовым переходом* (т.е. переходящие из кристаллической формы в аморфную при нагревании), диски эти позволяют не только записывать информацию, но стирать записанное и вновь записывать.

24.8 PHOTO CD

Технологией, прицельно ориентированной на хранение информации, полученной с высококачественных фотоизображений, явилась совместная разработка компаний Kodak и Philips, получившая название *Photo-CD*.

Очевидно, что фиксация изображения оригинальной сцены на цветной фотопленке — это самый простой способ получить в дальнейшем высококачественную цветную фотографию. Однако запись информации об изображении на диск в виде цифровых электронных сигналов — это возможность гибкого электронного *управления* этим изображением. Сам по себе фотоматериал, выбранный для регистрации сцены, годен лишь к производству отпечатков на фотобумаге (или, в случае слайда — проекции на экран). Но если кадр стандартного 35 мм слайда (или негатива) был оцифрован с разрешением 3072×2048 пикселей, то можно быть уверенным, что информация с этого кадра будет перенесена на диск без заметных потерь.

По каждому пикселу изображения может быть зафиксировано 256 (= 2^8 — 8 бит) уровней трихроматических сигналов на каждый RGB-канал системы. Объем информации на каждый кадр составляет 3072×2048×3 — более 18 мегабайт. Отметим также, что в отношении каждого оцифрованного изображения могут быть выполнены автоматические учет условий освещения, типа пленки, установок производителя, а также коррекция экспозиционных отклонений.

Если 18 мегабайт информации по каждому кадру пишутся на диск без изменений, то на одном диске умещаются данные лишь о 34 кадрах (и при этом требуется сравнительно долгое время для считывания информации). Чтобы уйти от этих ограничений, перед записью на Photo CD проводятся следующие мероприятия:

1. Трихроматические (RGB-) сигналы после гамма предыскажения конвертируются в яркостный и цветоразностные сигналы, которые в лексике Photo CD-системы звучат как *YCC*: *luma* (Y) и *chroma* (C_1 и C_2).

---

[1] Гигабайт — это 10^9 байт; байт — 8 бит.

[2] По разным данным аббревиатура RW означает либо «Read-Write» — «чтение-запись», либо «rewritable» — перезаписываемый. — Прим. пер.

2. Цветоразностные сигналы подвергаются субсэмплингу по вертикальному и горизонтальному направлениям, в результате чего требования к объему дискового пространства снижаются вдвое.[1]

3. Сигналы разбиваются на пять составляющих, благодаря чему изображение может быть считано с диска в пяти вариантах разрешения.[2]

24.8.1 Эталонное устройство ввода

Поскольку изначально предполагалось, что Photo CD-диски могут использоваться с разными регистрирующими материалами и разными системами визуализации, система кодирования сигналов разрабатывалась как *аппаратно-независимая* (см. раздел 33.13). Однако, поскольку большинство оцифрованных изображений какое-то время рассматриваются на экранах мониторов, в частности, экранах электронно-лучевых трубок, т.н. *эталонные значения цветностей кардинальных стимулов* должны соответствовать действующим телевизионным стандартам (спецификация CCIR[3] 6011 и 709). Плюс к тому, необходимо определить *эталонную белую точку* системы, в качестве которой была принята цветность стандартного осветителя CIE D_{65}.

Система, удовлетворяющая перечисленным выше требованиям, позволяет специфицировать т.н. *эталонное устройство ввода изображений* — устройство, спектральные чувствительности которого идентичны трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя по любой выбранной тройке эталонных кардинальных стимулов, но нормированных при этом так, что равновеликие значения трихроматических сигналов индуцируют воспроизведение стимула с цветностью D_{65}-осветителя. Данный принцип ведет к тому, что изображение сцены (освещенной D_{65}-осветителем и зафиксированной эталонным устройством), воспроизведенное дисплеем с эталонными кардинальными стимулами (цветности которых нормированы на цветность D_{65}), будет представлять собой колориметрическую копию сцены (при условии, что общая гамма системы равна единице и что все стимулы сцены не выходят за пределы цветового охвата эталонных кардиналов).

Отметим, что описанные условия, будучи образцовыми, в реальной практике не встречаются, но при этом почти всегда можно выполнить определенную коррекцию отклонений, к примеру: когда спектральные чувствительности устройства ввода соответствуют иному, не эталонному, набору трихроматических кривых Стандартного наблюдателя или когда цветности кардинальных стимулов отличны от эталонных — полная коррекция возможна за счет соответствующего матрицирования трихроматических сигналов.

Однако поскольку общая гамма телевизионных систем, как правило, не равна единице (см. раздел 19.13), а D_{65} недоступен в качестве фактического осветителе, — одним из путей имитации эталонного устройства ввода является фотопленка со слоями, спек-

---

[1] Четырехкратная редукция информации по обоим направлениям, применяемая в телевизионных системах PAL и SECAM, не дает идеальных результатов, поскольку гамма-коррекция ведет к тому, что часть яркостной информации передается по цветоразностным каналам — см. раздел 19.13

[2] Изображение, разрешение которого подходит широкому телевещанию, считывается менее чем за четыре секунды.

[3] Comite Consultatif International de la Radiodiffusion — Международный консультативный комитет по радиовещанию, МККР. — *Прим. пер.*

тральная чувствительность которых идентична набору полностью положительных трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (таких как спектрально заостренные кривые, показанные на рис. 19.10 [a]).

Работе устройства отображения требуется матрицирование линеаризованных сигналов, и при этом т.н. *внегамутные* стимулы сцены (т.е. колориметрические координаты которых лежат вне колориметрического охвата этого устройства) воспроизводятся некорректно. Однако же такая фотопленка позволяет уйти от проблем «метамеризма»: все стимулы, которые в сцене оказывают одинаковое воздействие на зрительную систему (т.е. являются метамерными), воспроизводятся по данному критерию одинаковыми, а большинство стимулов, которые оказывают разное воздействие — разными. Более того, широкополосные трихроматические кривые Стандартного наблюдателя (рис. 9.7 [b]) обеспечивают бо́льшую фотометрическую яркость воспроизводимых стимулов, нежели традиционные спектрально-заостренные кривые.

Чтобы получить значения эталонных трихроматических сигналов необходима следующая процедура: изображение на пленке сканируется с использованием красного, зеленого и синего фильтров. Затем сигналы сканера логарифмируются (см.раздел 14.16) с целью получения значений интегральных оптических плотностей, из которых вычисляют аналитические оптические плотности (см. раздел 14.20). На следующем этапе устраняют влияние межслойных эффектов (см. раздел 15.5) и по каждому слою фотоматериала вводят поправку на соотношение «оптическая плотность/логарифм экспозиции». Затем выполняется антилогарифмирование значений. Наконец, полученные величины матрицируются, дабы была возможность воспользоваться полностью положительными трихроматическими кривыми Стандартного наблюдателя вместо тех, что соответствуют эталонным кардиналам.

Когда коррекции отсканированного изображения не предполагается и необходимо получить лишь колориметрическую копию оригинала, то в процессе сканирования оригинал этот должен освещаться D_{65} (или любым другим специфицированным осветителем), спектральные чувствительности сканера должны быть идентичными какому-либо набору трихроматических кривых Стандартного наблюдателя или их линейной комбинации (условие Лютера —Айвса), а для приведения последних к эталонным кардиналам, фактические аппаратные сигналы сканера — матрицированы.

Процедуры, описанные в последних двух абзацах весьма трудно осуществимы и необходимость в них возникает лишь тогда, когда требуется полная аппаратная независимость.

Наконец отметим, что Photo CD-система допускает практически любой способ оцифровки фотоматериала и любой способ обработки полученных сигналов.

Разговор об относительных преимуществах применения соответствующего набора трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (или комплекта красного, зеленого и синего фильтров) для коррекции спектральных чувствительностей сканера см. в разделе 29.18.

24.8.2 Гамма-коррекция

Мы знаем, что поскольку гамма телеприемников существенно больше единицы (раздел 19.13), сигналы, идущие в телеэфир, подвергаются гамма-предыскажению. В системе Photo-CD трихроматические сигналы тоже подвергаются предыскажению и тем же путем. Если непредыскаженные сигналы обозначить как E_R, E_G и E_B, а гамма-предыскаженные сигналы как E'_R, E'_G и E'_B, то зависимости окажутся следующими:

При E_R, E_G, $E_B \geq 0.018$

$$E'_R = 1.099 E_R^{0.45} - 0.99$$
$$E'_G = 1.099 E_G^{0.45} - 0.99$$
$$E'_B = 1.099 E_B^{0.45} - 0.99$$

При E_R, E_G, $E_B \leq -0.018$

$$E'_R = -1.099 |E_R|^{0.45} + 0.99$$
$$E'_G = -1.099 |E_G|^{0.45} + 0.99$$
$$E'_B = -1.099 |E_B|^{0.45} + 0.99$$

При $-0.018 < E_R$, E_G, $E_B < 0.018$

$$E'_R = 4.5 E_R$$
$$E'_G = 4.5 E_G$$
$$E'_B = 4.5 E_B$$

Отметим, что величины иногда оказываются отрицательными, поскольку в трихроматических кривых Стандартного наблюдателя имеют место отрицательные значения.

Гамма-предыскаженные сигналы используются для получения сигналов YCC-формата:

$$Y = 0.299 E'_R + 0.587 E'_G + 0.114 E'_B = E'_Y$$
$$C_1 = -0.299 E'_R - 0.587 E'_G + 0.886 E'_B = E'_B - E'_Y$$
$$C_2 = 0.701 E'_R - 0.587 E'_G - 0.114 E'_B = E'_R - E'_Y$$

Сигналы визуализации вычисляются затем по уравнениям:

$$\begin{aligned} E'_R &= E'_Y + (E'_R - E'_Y) \\ E'_G &= E'_Y + (E'_G - E'_Y) \\ &= E'_Y + \left[-(0.114/0.587)(E'_B - E'_Y) - (0.299/0.587)(E'_R - E'_Y)\right] \\ E'_B &= E'_Y + (E'_B - E'_Y) \end{aligned}$$

Обратим внимание на то, что сигналы эти те же самые, что используются в телевизионных системах PAL и SECAM (см. гл. 22).

24.8.3 Форматы изображений

Изображения, хранящиеся на Photo CD-дисках, могут быть загружены в память компьютера в трех возможных форматах: *24-битном RGB*, *24-битном YCC* и *8-битном Grayscale*.

24.8.3.1 RGB-формат

Удобен для прямой визуализации на экране или для принтерной печати, не предполагающей высокой точности цветовоспроизведения (колориметрическое цветовоспроизведение требует того, чтобы устройство вывода было калибровано и чтобы конверсия данных из YCC-значений в RGB-значения учитывала характер т.н. *аппаратного отклика* этого устройства).

24.8.3.2 YCC-формат

Без каких-либо преобразований несет всю полноту информации, записанной на диск, но, вместе с тем, весьма удобен и для пересчетов в иные колориметрические и/или цветовые пространства без прохода через RGB. Когда же требуется конверсия данных в собственно RGB-значения, YCC-формат позволяет провести такое преобразование без потерь.

24.8.3.3 Grayscale-формат

Может использоваться с целью отображения на монохромных мониторах, а также в тех ситуациях, когда хроматический компонент изображений не имеет значения (или даже вреден — *Прим. пер.*). Отметим, что grayscale-изображения занимают втрое меньший объем памяти компьютера.

24.8.4 Варианты разрешения изображений

На Photo CD-дисках изображения хранятся в таком виде, что могут считываться в разных разрешениях (см. табл. 24.2). Как уже было сказано выше, хроматическая информация подвергается субсэмплингу вдвое по вертикальному и горизонтальному направлениям, в результате чего на одно хроматическое значение приходится четыре значения в яркостном канале. Субсэмплинг хроматических данных снижает объем требуемого дискового пространства до 9 Мб для 16 изображений.

Дополнительной и очень серьезной экономией места на диске является компрессия визуальных данных за счет сохранения лишь остаточных компонент изображений — т.н. *баз*, несущих информацию только о характере *отличий* пикселов на данном уровне разрешения от пикселов на предыдущем его уровне. Суть компрессии в том, что остаточные компоненты несут исключительно яркостную информацию (данное изображение используется с базовыми хроматическими сигналами, в результате чего хроматическая информация составляет всего лишь четвертую часть от информации яркостной). Таким образом, на Photo CD-диске может храниться порядка 100 изображений.

Base-изображение дает разрешение эквивалентное разрешению изображений в широковещательном телевидении.

Изображение *Base/16* — дает индексное изображение предпросмотра.

Разрешение изображения *16 Base* эквивалентно 35 мм формату фотоизображений.

Изображение *64 Base* используется для крупноформатных приложений (к примеру, 6×6 см) и может быть получено с помощью специальных сканеров высокого разрешения (но при этом число записанных изображений уменьшается в 16 раз).

24.8.5 Оборудование

Оснащение, необходимое для создания Photo CD-диска — это сканер и/или цифровая фотокамера, компьютер, программа управления Photo CD-данными, монитор и

ТАБЛИЦА 24.2 Варианты разрешения изображения, получаемые с Photo CD-дисков

	Фотометрическая яркость		Цветность	
	Строки	Пикселы	Строки	Пикселы
Base/16	128	192	64	96
Base/4	256	384	128	192
Base	512	768	256	384
4 Base	1024	1536	—	—
16 Base	2048	3072	1024	1536
64 Base	4096	6144	2048	3072

CD-RW-устройство. Готовые диски могут использоваться в Photo CD-проигрывателях при воспроизведении изображений на экранах мониторов, либо в специальных Photo CD-I-проигрывателях, позволяющих проводить интерактивный контроль: выполнять увеличение, кадрирование и прочие манипуляции. Для ввода данных в компьютер требуется Photo-CD-ROM.

Разумеется, Photo CD-диски могут использоваться для воспроизведения изображений на пленках и бумагах устройствами цифровой печати (см. гл. 33).

24.9 ТИРАЖИРОВАНИЕ ВИДЕОКАССЕТ И ВИДЕОДИСКОВ

Когда требуется большое число дешевых копий той или иной телепрограммы, нужно, чтобы время получения одного экземпляра копии было много меньшим, чем время хода самой программы.

Скоростное копирование магнитных записей сопряжено с определенными техническими трудностями, поскольку когда при записи лента протягивается со скоростью, превышающей крейсерскую, вследствие серьезных изменений частот сигналов возникают грубые потери качества. По этой причине были разработаны как минимум два метода высокоскоростной контактной печати на магнитной ленте:

— две ленты вместе (лента с оригинальной записью и приемная лента) двигались через магнитное поле, что позволяло добиться скорости записи 3.8 м/с.;

— оригинал и приемная лента нагревались в точке контакта, и, за счет применения специальных магнитных лент, скорость копирования достигала 1.5 м/с.

Дисковые же системы изначально были рассчитаны на высокую скорость копирования — их важным преимуществом, в данном контексте, является то, что даже целиком заполненный диск изготавливается сразу, а не путем последовательной записи (Doyle, 1982).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Anderson, C.E., and Roizen, J., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 68, 667 (1959).

Baldwin, J.L.E., Stalley, A.D., and Kitchin, H.D., J. Roy. Television Soc., 14, 3 (1972).

Bruch, W., Telefunken-Zeitung, 40, No. 3 (1967).

Bruch, W., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 81, 303 (1972).

CCIR Recommendation 709 (adopted 1990). Basic Parameter Values for the HDTV Standard for Studio and for International Programme Exchange.

CCIR Recommendation 6011. Encoding parameters of digital television for studios.

Dickopp, G., Brit. J. Phot., 118, 992 (1971).

Doyle, M.J., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 91, 180 (1982).

Gilbert, J.C.G., Wireless World., 76, 377 (1970).

Ginsburg, C.P., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 66, 177 (1957).

Kramer, P., and Compaan, K., Audio-Visual, 3, 16 January (1974).

Machein, K.R., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 68, 652 (1959).

Millward, J.D., Guisinger, B.E., and Roizen, J., I.E.E. Conference Publication No. 88, p.317 (1972).

Redlich, H., Brit. J. Phot., 118, 952 (1971).

Reynolds, K.Y., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 79, 922 (1970).

Ross, P., J. Roy. Television Soc., 15, 35 (1974).

Sawazaki, N., Yagi, M., Iwasaki, M., Inada, G., and Tamaoki, T., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 69, 868 (1960).

Tooms, M.S., J. Roy. Television Soc., 13, 4 (1970).

ЛИТЕРАТУРА

Abramson, A., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 82, 188 (1973).

Roizen, J., J. Roy. Television Soc., 16, 15 (1976).

25 ВИДЕОГРАФИКА

25.1 ВВЕДЕНИЕ

То, что телевизионные изображения состоят из электронных сигналов, позволяет манипулировать этими изображениями в самых широких пределах и самыми разными способами, а также дает возможность добавлять к этим изображениям информацию, полученную не только от телекамер (или в результате кинотелепроекции), но также графические сигналы компьютера (несущие данные либо о части изображения, либо даже о всем изображении). Аналогичные методы могут применяться в связке с т.н. *графическими сканерами*, описанными в разделе 29.9.

25.2 РАСЦВЕЧИВАНИЕ ВИДЕОЗАХВАТА

Вероятно, простейшим способом получения компьютерных изображений является «электронное раскрашивание» данных т.н. *видеозахвата*. Если, к примеру, телекамера зарегистрировала белые буквы на черном фоне, то чтобы снабдить эти буквы хроматическим компонентом, остается лишь в правильной временно́й последовательности добавить к яркостному сигналу камеры сигналы цветоразностные. Хроматический сигнал, дающий какую-либо одну прокраску, может быть добавлен к группе телевизионных строк, соответствующих первой строке захвата, а сигнал, дающий вторую прокраску — второй строке. Следующие строки захвата могут быть прокрашены сходным путем. Если требуется изменение цветности в рамках одного захвата (к примеру, для выделения первого слова), то цветоразностный сигнал может быть изменен в процессе развертки соответствующих строк.

Когда видеозахват прокрашивается описанным способом, результирующие цветовые стимулы искусственно *создаются* с помощью данных, включающих в себя инструкции по генерации сигналов и последовательности их коммутации; при этом информации об этих стимулах в исходном изображении, разумеется, не было.

Охват воспроизводимых стимулов в данном случае ограничивается не колориметрией пигментов, фотокрасителей или типографских красок, но только свойствами кардинальных стимулов телеприемника. Таким образом, в нашем распоряжении оказываются воспроизводящие стимулы, соответствующие сигналам максимальной цветности (см. табл. 22.3) и, следовательно, расцвеченный видеозахват может стать весьма и весьма полноцветным и выразительным (безусловно, сие позволяет воспроизводить стимулы и малой полноты цвета).

25.3 ЦВЕТОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ РИРПРОЕКЦИЯ

Раскрашивание изображений путем добавки сторонних цветоразностных сигналов не ограничивается одним лишь видеозахватом: простые графики и схемы также могут быть расцвечены аналогичным способом. Однако если последовательность коммутации сигналов достаточно сложна, метод теряет ценность — в данном случае будет намного удобнее управлять сигналами по методу т.н. *цветовой электронной рирпроекции*.

Цветовая электронная рирпроекция аналогична т.н. *плавающей маске*, до недавне-

го времени активно применявшейся при съемке кинотрюков, к примеру: по сюжету маленькая девочка должна стоять на ладони великана; девочка играет эпизод на черном фоне, а с отснятой и обработанной цветной обращаемой пленки получают сверхвысококонтрастный черно-белый негатив, на котором имеется лишь черный силуэт героини на прозрачном фоне. При копировании сцены с великаном на негативную пленку, на последнюю накладывается этот негатив, благодаря чему киноматериал под силуэтом девочки не экспонируется. После чего пленка экспонируется второй раз, но уже через оригинальный цветной позитив: изображение девочки «впечатывается» в неэкспонированный участок копировальной пленки, оставшийся от силуэта, а черный фон защищает оставшееся поле от паразитного переэкспонирования. Разумеется, необходима очень точная приводка контура девочки к ладони великана и изображения девочки к неэкспонированному участку негативной пленки. Иногда для экспозиции копировальной пленки приходится использовать дополнительный силуэт — прозрачный, расположенный на черном фоне. Отметим, что метод может быть усовершенствован за счет применения светоделителей и прочих устройств (Wheeler, 1969).

При цветовой электронной рирпроекции, применяемой на телевидении, вместо черных фонов используются интенсивно-окрашенные (самая распространенная окраска — синяя или зеленая, поскольку от таких расцветок проще всего уйти при организации студийной сцены). Процесс построен так, что в ответ на сигналы, соответствующие этим фонам, специальный коммутатор — т.н. *видеомикшер*, берет входные сигналы из другого источника. К примеру, если позади телеведущего расположен яркоокрашенный фон, то на заднем плане может демонстрироваться визуальный ряд обсуждаемых событий. При этом необходимо, чтобы объекты сцены, где сидит ведущий, не совпадали по цвету с фоном: в противном случае коммутатор вставит фоновое изображение в эти объекты и в изображении результирующем возникнут весьма комичные «дыры».

Микшер обычно настраивается так, что его работа зависит от величин цветоразностных сигналов. Однако с целью уменьшения эффекта колебания их мощности (например, ее снижения в тенях) прибор можно отрегулировать так, что его работа будет определяться величиной *цветности* фона, высчитываемой из цветоразностных сигналов и сигнала яркости (Davidse и Koppe, 1977).

Тенденцию к появлению паразитной хроматической каймы в микшируемых участках можно снизить, используя т.н. *стробирующие сигналы*, т.е. сигналы с менее крутыми подъемом и спуском, а также путем применения схем, исключающих из выходного потока сигналы цветоразностные, соответствующие тем объектам, которые не должны подвергаться замене (Nakamura и Kamakura, 1981).

Дабы обеспечить максимум реализма финальных изображений техника цветовой электронной рирпроекции подверглась различным усовершенствованиям, например, сегодняшняя технология позволяет, придав окрашенной области пространственную форму участков сцены, подлежащих замене, можно «положить» тени переднего плана на фон: актер ходит по студии возле одной из ее стен, а в результирующем изображении он прогуливается по улице вдоль стены дома, отбрасывая тень на тротуар и стену.

25.4 ТЕЛЕТЕКСТ

Вставка посторонних (дополнительных) сигналов возможна также в период между концом развертки последней строки первого полукадра и началом развертки первой строки следующего. Данный период называется *периодом гашения полукадра* и факти-

чески представляет собой время, за которое пучок развертки идет назад, то есть от нижней границы изображения к его верхней границе. Величина периода гашения занимает ощутимую часть от общего времени развертки полукадра, что, как правило, соответствует времени развертки 25 строк полного кадра (двух полукадров) 625 строчной системы (дающей 575 фактических строк) и 21 строки полного кадра 525 строчной системы (дающей 483 фактических строки). Однако, в отведенное время нужно, в первую очередь, передать т.н. *сигналы кадровой синхронизации*, позволяющие приемнику синхронизировать развертку полукадра с основными сигналами, то есть гарантировать то, что каждый полукадр начнется именно с верхней строки телеприемника и закончится именно на нижней его строке (а не выше или ниже). К счастью, сигнал кадровой синхронизации обычно занимает время эквивалентное времени развертки 10 строк, благодаря чему остается запас, равный времени развертки примерно двух строк. Это время и используется для передачи сигналов *телетекста* (см. рис. 25.1).

Сигналы телетекста несут в себе информацию, позволяющую телеприемникам поверх основного изображения воспроизводить буквы и цифры (*буквенно-цифровые символы*), а также простые схемы (*графические символы*). Как уже было сказано выше, используя специальные сигнальный буфер и считывающее устройство (входящие в состав приемника), а также за счет специальных процедур управления сигналами, область изображения можно заполнить телетекстом за время эквивалентное развертке всего лишь двух строк на полукадр. Такая возможность имеется благодаря тому, что:

— во-первых, поскольку телетекст — это статичное изображение, то нет необходимости описывать отличия между соседними кадрами;

— во-вторых, графические и буквенно-цифровые символы как таковые не передаются, а передаются лишь их коды, которые затем интерпретируется т.н. *знакогенератором* телеприемника. Знакогенератор формирует нужные символы из первичных элементов изображения (пикселов), образуя группы, состоящие обычно из семи строк, каждая из которых несет в себе по пять пикселов (5×7-матрицы). Одна матрица отвечает за один символ, сформированный из светящихся и несветящихся пикселов.

Как правило, знакогенератор воспроизводит 64 буквенно-цифровых символа и 64 графических. Сигнал телетекста при этом несет две серии чисел от 1 до 64, указывающих телеприемнику необходимую последовательность символов. Числа представлены в двоичной системе, использующей на каждое число 6 двоичных единиц или битов ($64 = 2^6$). Без знакогенератора 35 пикселов матрицы потребовали бы 35 бит;

— в-третьих, количество отображаемых символов обычно ограничивается 24 строками и 40 колонками. Несмотря на то, что более плотная паковка символов позволила бы передавать большее количество текстовой информации, разборчивость текста при этом ощутимо снизилась бы;

— в-четвертых, тональный и хроматический выбор у телетекстов обычно сокращен до четырех позиций по фотометрической яркости и четырех по цветности — требуя при этом всего лишь двух бит ($4 = 2^2$); либо же до 8 позиций — требуя трех бит ($8 = 2^3$).

При данной организации телетекста время, необходимое для передачи полного пакета текстовой информации, или как говорят — *страницы*, равно числу рядов на странице деленному на число рядов, передаваемых за одну секунду: число рядов в секунду равно 100 у 50-герцовых систем и 120 — у 60 герцовых. Следовательно, время передачи страницы, состоящей из 24 рядов, будет равным 0.24 и 0.20 с соответственно. Таким образом, в системах обоих типов (при стандартном периоде строчной развертки) информация по всем 40 колонкам укладывается в 64 микросекунды. Однако это время можно сократить до 52 микросекунд, если стандартный телесигнал будет определять-



Рис. 25.1 Все шесть изображений созданы компьютером. *Верхний ряд*: изображения, передаваемые в период гашения (Teletext Level 4 — см. раздел 25.4). *Центральный и нижний ряды*: видеографика, предназначенная к обычной телетрансляции (см. раздел 25.6).

ся временем необходимым для передачи т.н. *сигнала горизонтальной синхронизации* (*строчного синхросигнала*) и сигналом цветосинхронизации (см. раздел 22.8).

В обсуждаемый период по каждой из 40 колонок требуется передать шестибитное число, указывающее на нужный символ телетекста (в сумме 240 бит информации). Плюс к тому, необходимо добавить биты для организации формата экранного отображения, то есть обозначить участки экрана, отведенные буквенно-цифровому представлению информации и графическому, а также выбрать яркость и цветность первого и второго. Общее количество битов на строку обычно равно 300, поэтому при 52-секундном строчном периоде требуемый битрейт составляет 6 Мбит/с.

Итак, если, положим, система дает 100 страниц телетекста, то при 0.24 с на страницу общее время показа составит 24 с. Пользователь выбирает страницы по специальному оглавлению, указывающему последовательность нажатия кнопок на пульте дистанционного управления телевизором. После нажатия кнопки приемник выбирает требуемую страницу и затем сохраняет сигналы, используя их в дальнейшем при генерации соответствующих телесигналов. Страницы передаются последовательно, поэтому пользователь вынужден ждать определенное время, пока нужная страница появится на экране. При 24-секундном цикле задержка может составлять от 24 секунд (если запрашиваемая страница только что была на экране) до, условно говоря, нуля (если запрашиваемая страница следует за только что отображенной) и в среднем равна 12 секундам. Однако же, поскольку пустые ряды и пустые страницы не требуют времени, то, если (в среднем) каждый третий ряд и каждая третья страница будут пусты, время сократится до 2/3, то есть примерно вдвое. Плюс к тому, время задержки можно уменьшить, если телеприемник часть страниц будет удерживать в своей оперативной электронной памяти.

Если телеприемник подключить к какому-либо информационному источнику, к примеру телефонной линии, то возможно т.н. *двустороннее взаимодействие*, позволяющее принимать гораздо большее число страниц телетекста.

25.5 ЦВЕТНЫЕ МОНИТОРЫ

Когда визуализируемая информация взята не из широковещательных телеканалов (или телефонных линий), а из какого-то локального источника, то форма и информационное содержимое сигналов практически ничем не ограничены, благодаря чему существенно расширяется диапазон фотометрических яркостей и цветностей. При этом вместо телеприемника можно использовать специально разработанный для этих целей *монитор*.

До самого недавнего времени цветные мониторы строились на электронно-лучевой трубке с теневой маской, несущей на себе паттерн особо мелких точек: размер пиксельной триады трубки монитора обычно составлял 0.3 мм (иногда 0.2 мм) вместо стандартных телевизионных 0.7 мм (см. раздел 21.4). Однако последнее время широчайшее распространение получили LCD-дисплеи высокого разрешения. И в первом, и во втором случаях оператор может сидеть близко к экрану: обычное просмотровое расстояние при работе за монитором составляет порядка полуметра.

Для получения наиболее читабельного и наиболее приятного глазу телетекста матрица образования литер может быть увеличена с 5×7 до 7×9 пикселов или даже до 9×13 (либо же преобразована для образования знаков, состоящих из *линий*, а не из точек; однако в данном случае для обеспечения должного уровня качества, размер матрицы оказывается несколько меньше, чем 5×7).

Наибольшего качества экранных символов добиваются путем сдвига отдельных точек (или линий) на половину зазора между соседними элементами матрицы (Brockhurst, Day, Dyer и Vivien, 1982). Повышения визуального комфорта обычно достигают за счет минимизации зеркальных отражений от передней поверхности монитора и увеличения частоты развертки (что позволяет вместо чересстрочной развертки использовать т.н. *прогрессивную*).

25.6 ВИДЕОГРАФИКА

Схемы и графики, иллюстрирующие оперативные телепрограммы (такие как новости и текущие события) можно загрузить из компьютеров (последние активно применяются в сегодняшнем широковещательном телевидении). Один из подходов к вопросу таков (Long, 1982) (см. рис. 25.1 и 25.2): компьютер выступает в роли хранилища примерно 1000 графических шаблонов. Размер шаблона варьирует от одного пиксела до полноценного изображения. Шаблоны могут быть скопированы с физического оригинала изображения (либо созданы программным путем), могут представлять собой рирпроекционные кривые, либо же могут быть нарисованы от руки с помощью компьютерного графического планшета (содержащего проволочную сетку, необходимую для детекции положения электронного пера) или даже с помощью обычной компьютерной мышки.

Каждому шаблону может быть присвоено только одно цветовое наименование из палитры на 512 образцов.[1] Полную спецификацию шаблона, т.е. информацию о его форме, размере, вертикальной и горизонтальной позициях, фотометрической яркости и цветности (или последовательности их изменения, если изображение пестрое), а также т.н. *приоритете* — несет в себе т.н. *файл визуализации*. Приоритет указывает на то, какой из шаблонов должен быть «снаружи» в случае их наложения друг на друга.

Простейшие анимации воспроизводятся за счет использования шаблонов в качестве т.н. *компоновочных блоков*, которые появляются или исчезают через определенные промежутки времени, к примеру: столбик гистограммы отрисовывается как стопка мелких прямоугольничков и может, подобно кирпичной стене, расти или уменьшаться за счет их добавки или пропадания.

Реалистичные изображения простых трехмерных объектов, таких как кубы, пирамиды или параллелепипеды могут воспроизводиться путем подбора для их граней окраски той же цветности, но меньшей или большей фотометрической яркости.

Целиком реалистичные объекты можно вставить в шаблон за счет электронной рирпроекции, когда замещающее изображение получено либо от телекамеры, либо с помощью кинотелепроекции.

Примером, иллюстрирующим сказанное выше, может служить выборная кампания: интересующая страна или область задаются одним шаблоном, а ее субъекты (штаты, губернии и пр.) — отдельными шаблонами. В начале выборов каждому компоненту присваивается серый, а дальше по ситуации: если количество голосов, отдаваемых за того или иного кандидата растет — окраска меняется на красную, за другого — на зеленую, за третьего — на синюю и т.д. За счет тонких зазоров между шаблонами, проглядывающий фон задает границу регионов, голосующих одинаково и, следователь-

---

[1] В ряде случаев (в частности, таких как WEB-графика) вполне можно ограничиться палитрой на 256 цветовых образцов.



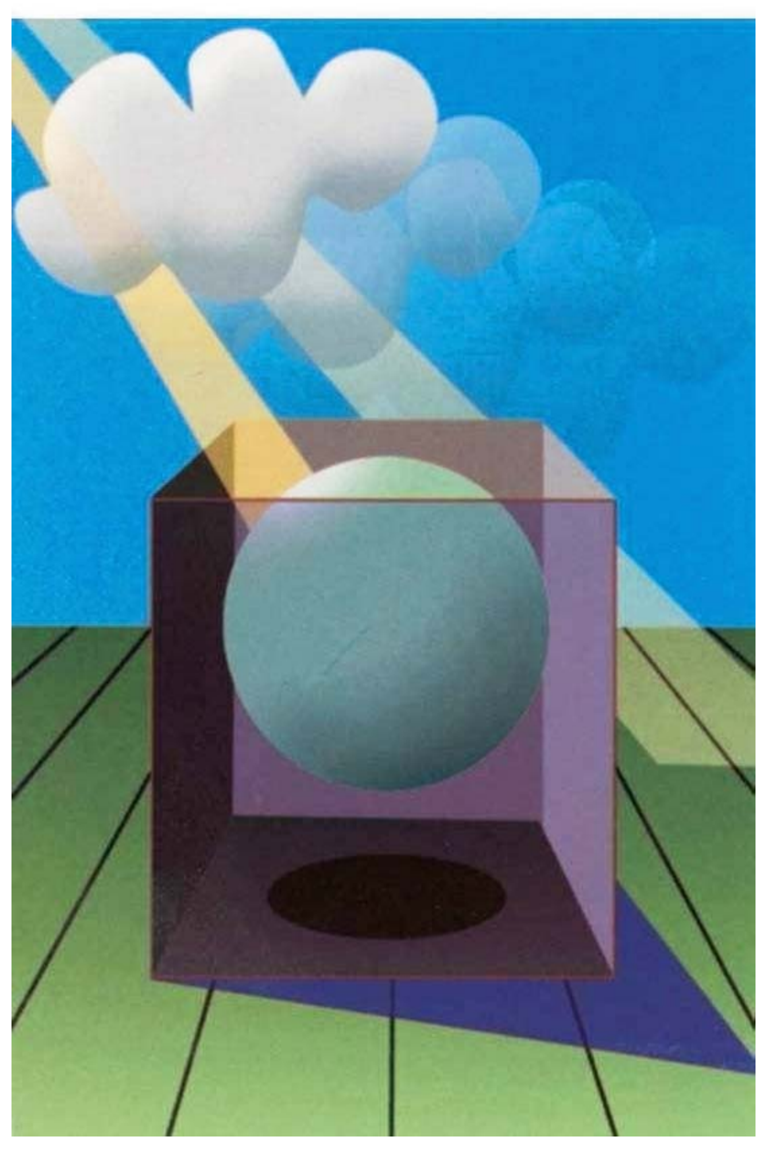


Рис. 25.2 Оба изображения полностью созданы компьютером (см. раздел 25.6).
Вверху: пример результата работы системы Quantel DPB 7000 Digital Paint Box. Манипулирование электронной «кистью» на графическом планшете позволяет добиться эффекта, сходного с работой художника, поскольку графические редакторы дают возможность имитировать разные виды кисточек.
Внизу: аналогичный результат, полученный Питером Мак-Аллистером с помощью сканера Crosfield. Изображение любезно предоставлено Crosfield Electronics Limited.

но, одинаково окрашенных. Рост поддержки избирателями различных кандидатов может демонстрироваться с помощью анимированных графиков.

25.6.1 Видеографика в авиации и мореходстве

В авиации компьютеры используются при воспроизведении графики, дающей важную информацию экипажу авиалайнера. Устройства визуализации до самого недавнего времени представляли собой электронно-лучевые мониторы (но сегодня в основном применяются LCD-дисплеи). Информация визуализировалась либо в *растровой* форме (т.е. также как в широковещательном телевидении), либо в *штриховой* (иногда говорят *каллиграфической*, *курсивной* или, чаще всего — *векторной*). В последнем случае единичный электронный пучок отрисовывал символы, описывая их контур непосредственно, а не строка за строкой, как в растровом варианте. Преимущество векторного отображения состояло в том, что за счет относительно низкой скорости отрисовки контуров достигалась максимальная субъективная яркость изображений, а также в том, что удавалось уйти от паразитной зубчатости краев тех линий, что должны были быть прямыми. Векторная форма визуализации позволяла также выполнять *заливку* просвета между близко расположенными друг к другу линиями (что иногда именуется *затенением*, *растушевкой* или *шейдингом*).

Оба варианта показа (растровый и векторный) могли быть одновременными за счет переключения от одного к другому в течение одного кадрового периода, либо же векторная информация вставлялась в период гашения. Такой способ позволял растровым путем визуализировать информацию фотореалистичного или картографического характера, тогда как графические элементы (например, траектория полета — *Прим. пер.*) накладывались в векторном виде (что исключительно удобно пилотам).

Высокотехнологичная видеографика активно используется в т.н. *имитаторах*, предназначенных для обучения и тренинга авиапилотов, моряков и космонавтов (см. рис. 25.3). Программное обеспечение разработано так, что топографические данные и данные навигационного оборудования, включающие в себя позиции аэронавигационных огней и GPS-координаты, отображаются на дисплеях одновременно, позволяя пилотам уверенно «вести» судно по заданному курсу. Аэронавигационные огни могут отображаться на экране путем вставки соответствующих сигналов между растровыми изображениями в период гашения, что позволяет им быть очень яркими и независимыми от строчной структуры показа.

С целью придания реализма работе авиаимитаторов компьютерная графика позволяет «воспроизводить» любое ускорение или замедление движения авиасудна. Более того, компьютерные программы в состоянии учесть огромный диапазон условий, соответствующих времени суток, времени года, погоде и даже таких, какие крайне редко встречаются в реальной практике. Устройство особо реалистичных дисплеев, применяемых в имитаторах (а также их вспомогательного оборудования), очень сложно и очень дорого, из-за чего дисплеи эти не находят применения в фактических полетах и плаваниях.

25.6.2 Видеографика в дизайне и архитектуре

Высокотехнологичная видеографика широко применяется в дизайне и архитектуре, в частности, позволяет быстро и эффективно разрабатывать проекты интерьеров помещений, выполнять эскизы оформления комнат и т.п. В компьютер можно загрузить шаблоны будущих стен, полов, покрытий, ковров, занавесок, фурнитуры и т.п.





Рис. 25.3 *Вверху*: компьютерная имитация кабины боевого самолета и взлетно-посадочной полосы. *Внизу*: кабина тренажера пилотов гражданской авиации. Для большей реалистичности растровые дисплеи (см. раздел 25.6), управляемые компьютером и имитирующие в данном примере взлетно-посадочную полосу, вмонтированы в окна кабины.





Шаблоны эти могут иметь разные экранные яркость и цветность, что необходимо при отработке цветовых схем интерьеров. Аналогичные методы применяются при разработке дизайна тканей, ковровых покрытий, обоев, керамики и прочих мозаичных объектов, в отношении которых важно, чтобы их составные элементы были окрашены по-разному (см. рис. 25.4).

Для решения архитектурных задач были разработаны программы, позволяющие изображать здания с учетом их пространственной перспективы, используя при этом как обычные планы, так и вертикальные проекции, и виды сбоку. В данном случае нужно, чтобы ближние планы имели приоритет над дальними, дабы была различима фактура поверхностей. Перспективное отображение требует от системы способности менять углы в рамках одного шаблона, согласуя т.н. *точку схода перспективы* с выбранной точкой наблюдения. Архитектурные программы позволяют также прогрессивно менять видимую точку схода, в результате чего становится возможным анимированное представление, т.е. здания приобретают возможность вращаться на экране по желанию пользователя. Отметим, что наличие теней, «отбрасываемых» архитектурным объектом, добавляет реализма экранным изображениям. Плюс к тому, плоскостям могут быть присвоены различные окраска и текстура, представляющие различные архитектурные поверхности, такие как кирпичная кладка, бетон, дерево, гипс, камень, черепица и т.п. Стоит сказать также, что текстурные паттерны выглядят более реалистичными, если получены из фотографий или фактических материалов. Паттерны сохраняются в памяти компьютера в виде цифровых электрических сигналов и могут по мере необходимости вводиться в шаблон той или иной поверхности. Форму паттернов, разумеется, можно менять, дабы придавать им правильную перспективу, а также всегда имеется возможность наложить блики, тени и хроматические рефлексы.

Обсуждаемые системы могут работать в интерактивном режиме, позволяющем менять установки программ. Наконец, если это возможно, за счет смешения сигналов архитектурного дизайна с сигналами фотоизображения местности, можно задолго до начала строительства наглядно продемонстрировать то, как будут выглядеть будущие здание или сооружение (рис. 25.5). Аналогичные методы могут применяться в связке с полиграфическими сканерами (см. рис. 29.3, 29.4 и 29.8).

25.6.3 Неэкранная визуализация видеографики

В тех случаях, когда экранное разрешение цветного дисплея оказывается неадекватным поставленной задаче, большей деталировки изображений можно добиться обходными путями, например, монохромная электронно-лучевая трубка высокого разрешения (2000×2000, 4000×4000 или 6000×6000 пикселов — см. раздел 33.7) может последовательно через красный, зеленый и синий фильтры проэкспонировать фотопленку (или фотобумагу). Однако сегодня с целью обеспечения высокого разрешения изображений применяются цифровые принтеры.

25.7 КОМПЬЮТЕРНАЯ МУЛЬТИПЛИКАЦИЯ

О компьютерной анимации можно говорить как о простейшей мультипликации. В традиционной мультипликации обычно реализуется гораздо больший набор движений и используются намного более сложные шаблоны. Однако компьютеры очень удобны в «отрисовке» этих шаблонов, что избавляет художника-мультипликатора от

Рис. 25.4 Компьютерные изображения, в которых для большей реалистичности на объекты положены блики, тени, прозрачности и хроматические рефлексы.



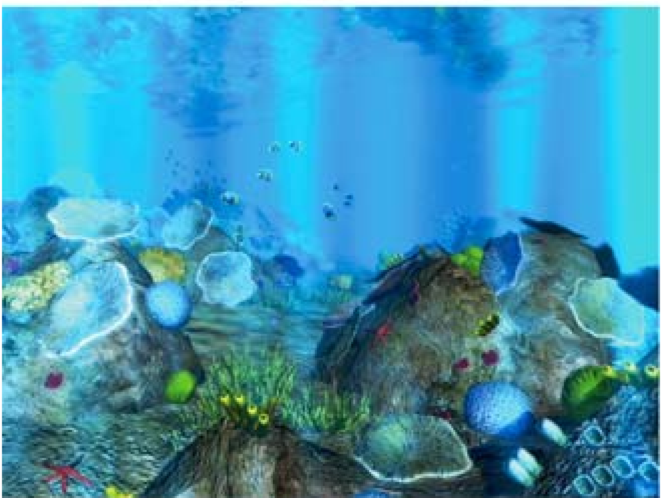










Рис. 25.5 Компьютерная имитация внешнего вида будущих зданий и сооружений с разных точек их обзора исключительно полезна архитекторам. В данном примере даны компьютерные имитаты будущего здания коммерческого банка с трех разных точек наблюдения (см. раздел 25.6). Аниматор: Майкл Коллери.

рутинной ручной работы: пером графического планшета аниматор вычерчивает т.н. *ключевые прориси*, а задача компьютера в этом случае — отчертить контуры для всех промежуточных кадров и выполнить цветные заливки этих контуров. Компьютер рассчитывает пути изменения формы, фотометрической яркости и цветности каждой отдельной области изображения, а также размер, пространственную позицию и даже режим пропадания. Визуальные отличия между элементами переднего и заднего планов, как правило строятся только за счет изменений в последних, но, если нужно, компьютер может дать инструкции и по приоритетам. Элементы переднего и заднего планов хранятся в памяти компьютера и по мере необходимости меняются в размере, перекрашиваются, репозиционируются, поворачиваются и т.п. (Halas, 1982).

25.8 КОДИРОВАНИЕ ЦВЕТНОСТЬЮ

Подкрашивание изображений — т.е. принудительная знаковая окраска их отдельных элементов, часто используется для того, чтобы снабдить эти изображения дополнительной визуальной информацией, которой нет в естественных сценах. К примеру, в астрономии, тончайшие отличия между видимыми спектрами звезд, планет и прочих небесных объектов могут быть принудительно визуализированы за счет предварительного присвоения им очевидно разных яркостей и цветностей. Такие изображения дают астрономам ясное представление о вариациях важных физических показателей, в частности таких как температура или коэффициент отражения поверхности небесного объекта. Но еще раз подчеркнем, что такие изображения не имеют отношения к визуальному восприятию реальных сцен.

В разделе 12.10 были описаны фотопленки, изготовленные так, что воспроизводили листву не зеленой, а красной. Когда информация об изображении доступна в цифровом виде (либо за счет сканирования, либо за счет электронных камер), компьютеры обеспечивают колоссальную гибкость в выборе яркости и цветности финального показа. Одним из примеров использования такой технологии является визуализация уровня нагрева каждой точки сцены: сцена регистрируется с применением датчика, чувствительного к инфракрасному излучению, после чего данные поступают в компьютер. На экране всем областям, имеющим уровень излучения в рамках некоего одного узкого диапазона, присваивается одна цветность, другого — другая и т.п., благодаря чему можно создать цветовую контурную карту температур, в которой изменение цветности есть функция от нагрева (England и Parker, 1972).

Еще одной областью применения технологии данного типа является геологоразведка. Изображения земной поверхности, полученные путем аэро- или спутниковой фотосъемки с применением датчиков, чувствительных к излучению не только видимой части спектра, но и к инфракрасному и ультрафиолетовому излучениям, сохраняются в памяти компьютера и визуализируются в технике кодирования цветностью, выделяющей объекты, представляющие тот или иной специфический интерес (Goetz, Billingsley, Gillespie, Abrams, Squires, Shoemaker, Lucchitta и Elston, 1975).

В космических исследованиях с целью максимально возможной информации о планетах (в частности, о Луне) применяются сенсоры с еще большим диапазоном спектральной чувствительности. Кодирование цветностью и здесь используется для того, чтобы подчеркнуть отличия одного участка поверхности от другого (Huck и Wall, 1976). Изображения, которых ждут от космических зондов, можно заблаговременно имитировать с помощью компьютеров и поупражняться в тактике интерпретации изображений реальных по мере их поступления с зонда (рис. 25.6).

25.9 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ОХВАТЫ

Из всего сказанного выше ясно, что компьютеры — это весьма эффективный инструмент *создания* изображений. Теперь же нам предстоит рассмотреть те факторы, которые определяют цветовой выбор воспроизводимых стимулов для разных областей применения компьютерной графики.

25.9.1 Охваты цветностей телетекстов

При визуализации буквенно-цифровых символов и простых графических элементов, к примеру, телетекстов, наиболее важным требованием является максимально высокая чистота их цвета. Если выбор ограничивается двумя стимулами, к примеру: белые буквы на черном фоне или наоборот, то достаточно простого черно-белого монитора. Но ежели используется цветной монитор, то синие буквы на белом фоне (или желтые на черном) будут смотреться комфортнее (но, вероятно, несколько менее читабельными).

Выбор одного стимула из двух возможных требует одного бита информации. При двух битах появляется выбор из четырех возможных стимулов ($2^2 = 4$).

При визуализации символов, расположенных на черном фоне, для достижения максимального визуального контраста с этим фоном требуется как максимальная фотометрическая яркость элементов, так и максимально выраженная хроматичность. Поэтому, чаще всего, последние воспроизводятся интенсивно-зелеными, голубыми, желтыми, красными или оранжевыми. То есть, когда нужно добиться максимального отличия между элементами и фоном, то лучшим выбором являются собственно кардинальные стимулы монитора — красный, зеленый и синий. Однако следует помнить, что субъективная яркость синих элементов всегда ниже, чем у красных и зеленых. Плюс к тому, фокусировка зрения по коротковолновым (синим) стимулам всегда затруднительна, и, следовательно, они не годятся для воспроизведения мелких символов.

Когда нужен пространственно мелкий стимул синего тона, то стараются снизить его колориметрическую чистоту за счет подмешивания к нему света красного и/или зеленого кардиналов.

Когда слишком темным оказывается красный, то вместо него пользуют оранжевый.

При трех битах информации выбор ограничивается восьмью вариантами ($2^3 = 8$): по черным фонам хорошим решением является комплект из красного, зеленого, голубого, белого и желтого (или янтарного). При этом добавка еще двух вариантов оказывается затруднительной.

Напомним, что существует только четыре перцепционно-однозначных цветовых тона: красный, желтый, зеленый и синий (все прочие цветовые тона характеризуемы через ментальные комбинации этих четырех). Четыре однозначных цветовых тона, плюс белый и черный (ахроматические), дают шесть однозначно идентифицируемых оттенков. Более того, замечено, что использование более чем пяти цветовых тонов (плюс фон) при экранном воспроизведении буквенно-числовых символов и простых схем может вызвать визуальный конфликт. Следовательно, добавка еще двух стимулов, в частности, таких как малиновый (часто именуемый «розовым») и синий, в ряде ситуаций лишь ухудшает результат (Christ, 1975; Robertson, 1980).

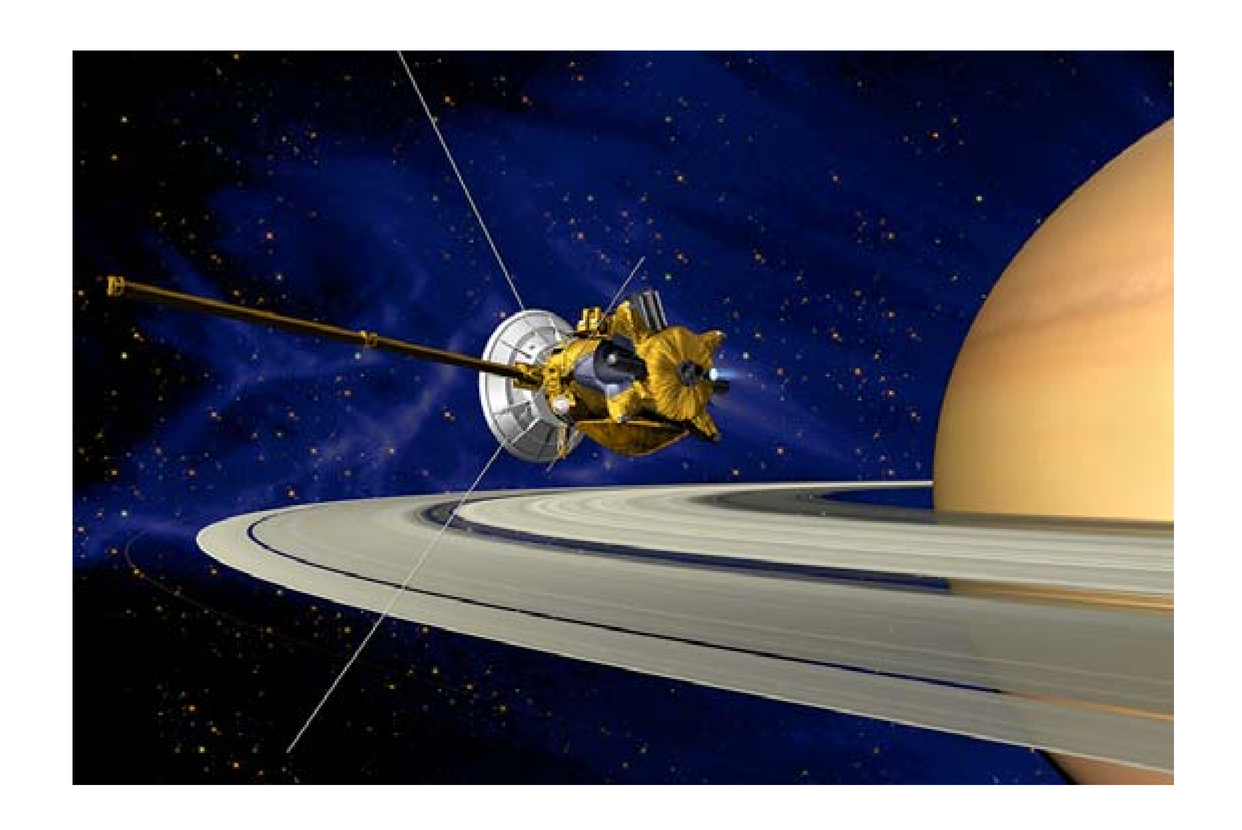
Сходные рассуждения применимы к визуализации символов на белом фоне, однако в данном случае для достижения максимального визуального контраста требуются стимулы, фотометрическая яркость которых много ниже, чем у фона, и выбор, поэто-

Рис. 25.6 В космических исследованиях (пилотируемых и непилотируемых) весьма практична визуализация различных ситуаций, возникающих в реальности, но при этом не различимых человеческим зрением. Такая визуализация позволяет зрительно распознавать происходящее и судить о нем (см. раздел 25.8).
Вверху слева: фрактальная компьютерная имитация восхода Земли над Луной.
Внизу слева: компьютерная имитация «внешнего вида» планеты Уран с борта космического зонда Voyager.



Вверху справа: компьютерная имитация «внешнего вида» планеты Сатурн с борта космического зонда Cassini.
Внизу справа: компьютерное расцвечивание фотографии Мимаса (спутника Сатурна) по критерию нагрева его поверхности.





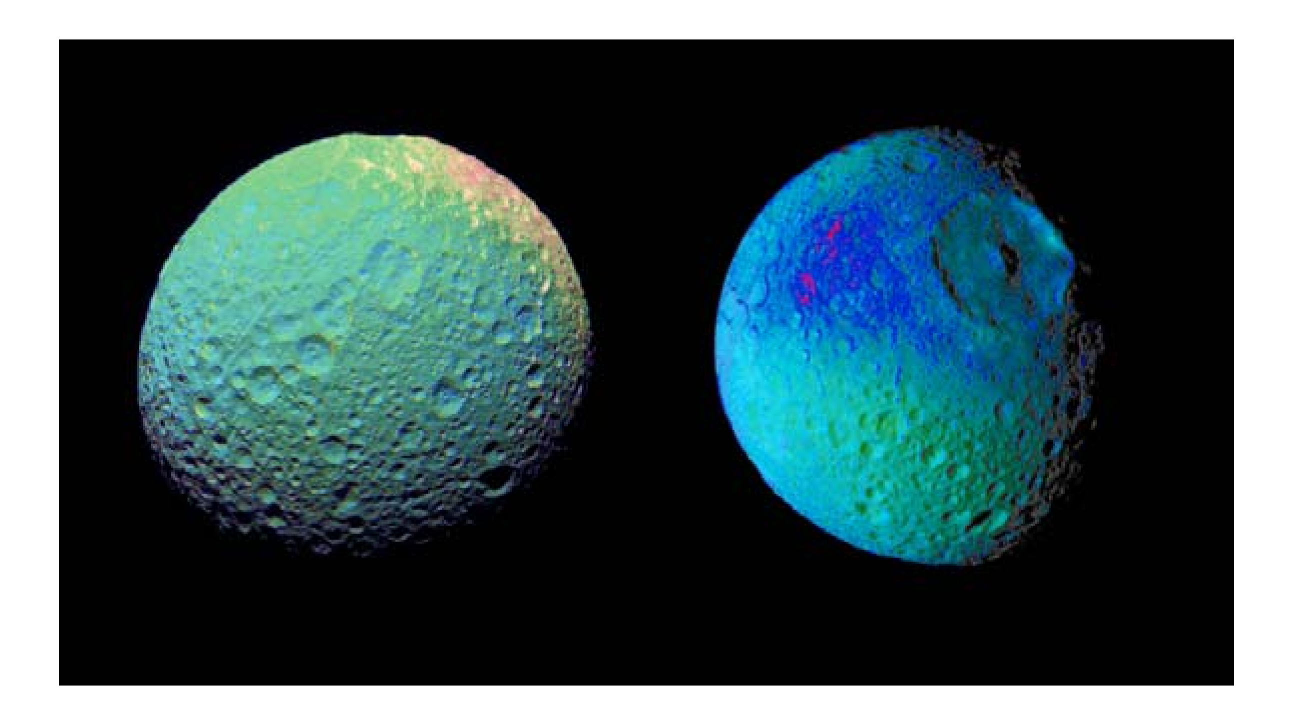


ТАБЛИЦА 25.1 Подбор стимулов по цветовому тону

Количество	2	3	3	4	5	5	6	7	7	8	8	9
Белый			×			×	×	×	×	×	×	×
Голубой			×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Зеленый	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×
Желтый										×	×	×
Янтарный		×		×	×	×	×	×	×			
Оранжевый			×							×	×	×
Красный	×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×
Розовато-лиловый								×		×		×
Малиновый					×		×		×		×	
Пурпурный								×		×		×
Синий									×		×	×

ТАБЛИЦА 25.2 Координаты цветностей стимулов, лежащих в углах фигур рис. 25.7

	1		2		3		4	
	u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'
Голубые	0.16	0.36	0.11	0.22	0.07	0.32	0.15	0.40
Зеленые	0.14	0.53	0.08	0.58	0.16	0.57	0.17	0.54
Желтые	0.22	0.55	0.22	0.57	0.27	0.56	0.26	0.54
Янтарные	0.26	0.55	0.27	0.56	0.31	0.55	0.28	0.52
Оранжевые	0.28	0.52	0.31	0.55	0.36	0.54		
Красные	0.31	0.48	0.43	0.53	0.57	0.51		
Розовато-пурпурные	0.30	0.45	0.55	0.41	0.47	0.29	0.28	0.42
Малиновые	0.28	0.42	0.47	0.29	0.37	0.17	0.25	0.40
Пурпурные	0.25	0.40	0.37	0.17	0.28	0.05	0.23	0.35
Синие	0.21	0.34	0.19	0.08	0.16	0.13	0.19	0.35
Белые	0.1978	0.4683	с радиусом окружности 0.028					

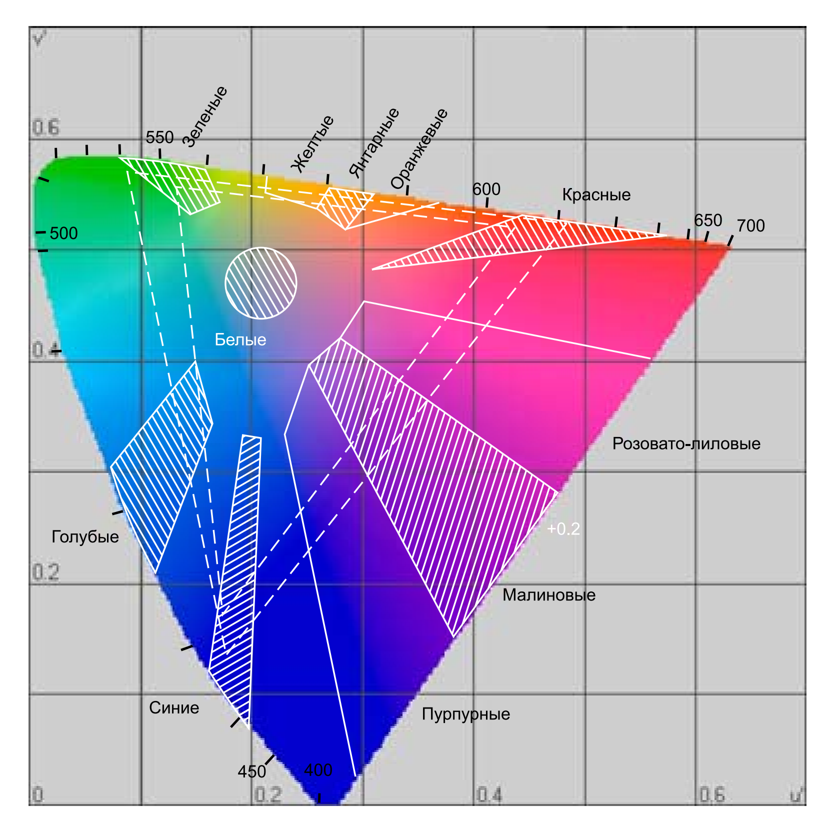


Рис. 25.7 Возможные цветности семи стимулов, дающих максимальные визуальные отличия (заштрихованные области). Незаштрихованные области — альтернативные зоны цветностей дополнительных восьмого и девятого стимулов. Пунктирные линии демонстрируют максимальный (внешний треугольник) и минимальный (внутренний треугольник) охваты цветностей CRT-мониторов с теневой маской (Laycock, 1984).

му, ограничивается черным, синим, красным, пурпурным, зеленым и, возможно, голубым. Желтый же не годится — слишком светлый.

Заштрихованные области рис. 25.7 демонстрируют участки цветностей для семи стимулов (белого, голубого, зеленого, янтарного, красного, малинового и синего), отобранных по принципу обеспечения ими максимальных перцепционных отличий (Laycock, 1984). За счет добавки желтого и оранжевого — вместо янтарного, а также розово-лилового и красно-пурпурного — вместо малинового, это количество можно поднять до девяти (области цветностей дополнительных стимулов отмечены сплошными линиями).

Табл. 25.1 демонстрирует принцип подбора стимулов, когда их выбор варьирует от двух до девяти. В табл. 25.2 даны цветности угловых точек, определяющих штрихованные и контурные области рис. 25.7. за исключением белого, чья область цветностей на $u'v'$-диаграмме отмечена кругом с радиусом 0.028 и с центром в точке цветности D_{65}-осветителя.

Когда угол стимуляции достаточно мал, различимость в направлении к синему стимулу (и от него) снижается (см. раздел 22.10). Снижение это примерно равно одной пятой снижения различимости по красно-зеленому направлению, возникающему тогда, когда угол стимуляции падает до нескольких угловых минут (Phillips, 1985).

25.9.2 Колориметрические охваты видеографики

В видеографике рабочая палитра существенно богаче. Принципиальной отличием, расширяющим колориметрический охват видеографической системы, является возможность воспроизводить стимулы одной цветности, но разной фотометрической яркости, что в отношении т.н. *монолитных фигур* позволяет имитировать эффекты направленного освещения, т.е. накладывать блики, хроматические рефлексы и тени.

При 4 битах выбор ограничивается 16 возможными стимулами ($2^4 = 16$): используются 5 базовых стимулов с тремя градациями фотометрической яркости, 3 базовых стимула одного варианта яркости и еще 3 базовых стимула с четырьмя градациями. Одна из применявшихся ранее систем воспроизводила 16 стимулов, выбиравшихся из палитры, дававшей по 64 яркостных градации в каждом трихроматическом канале, то есть, предлагавшей выбор из 262144 вариантов смеси (Brockhurst, Day, Dyer и Vivien, 1982). Также есть данные о применении шестибитовых систем (64 стимула) и 9 битовых (512) (Long, 1982).

Для большей реалистичности изображений, которая порой необходима схемам и мультипликациям, требуется больший выбор воспроизводимых стимулов. Решение этой проблемы максимально экономичным путем — весьма интересная задача, и здесь, пожалуй, наиболее важным требованием является обеспечение всей полноты яркостных градаций воспроизводимых стимулов. Количество уровней сигнала необходимое для ухода от паразитных контурных эффектов критически зависимо от количества градаций фотометрической яркости, которое способна обеспечить данная система (см. раздел 33.2). Чаще всего используют 256 уровней яркости (8 бит) по каждому трихроматическому каналу (в сумме 24 бит), что в итоге дает выбор из 16777216 вариантов смеси (однако максимальное число распознаваемых предметных стимулов обычно держится в районе 10 млн. — Judd и Wyszecki, 1975). Вместе с тем, результаты вполне приемлемого качества можно получить даже при 64 уровнях яркости на канал, т.е. — 6 битах. Если таковое осуществимо с одной из 32 двух вариантов цветности стимула (5 бит), то на выходе получим 11 бит. 32 варианта цветности выбираются из 32 двух точек равноудаленно распределенных на какой-либо перцепционно-равномерной диаграмме цветностей.

В случае необходимости компьютерную программу можно настроить так, чтобы переходы между яркостями и цветностями были плавными. Безусловно, тонкие изменения цветности по такой схеме невоспроизводимы, но если к визуализации добавлены текстуры, полученные от реальных объектов, то достигается весьма и весьма высокий уровень реалистичности, вплоть до того, что виртуальные объекты порой становятся неотличимыми от изображений объектов фактических.

25.10 РАСЦВЕЧИВАНИЕ И РЕСТАВРАЦИЯ КИНОФИЛЬМОВ

Методы, описанные в текущей главе, успешно применяются в целях превращения черно-белых кинофильмов в цветные. При этом, как правило, приходится принимать ряд произвольных решений в отношении того, какую окраску придать тем или иным элементам изображений. Тем не менее, опыт свидетельствует, что путем компьютерного *расцвечивания* черно-белых оригиналов можно получить цветные фильмы, воспринимаемые с высокой степенью визуального комфорта (Davis, 1988).

При *реставрации* старых кинолент, копии которых пострадали от времени, используются аналогичные методы. Современная реставрация задействует цифровой

подход, который, в частности был блестяще применен при восстановлении знаменитой диснеевской «Белоснежки» (Cinema Technology, 1993).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Brockhurst, D., Day, S., Dyer, M., and Vivien, R.H., J. Royal Television Soc., 19, 33 (1982).

Christ, R.E., Human Factors, 17, 542 (1975).

Cinema Technology, Cinema Technology, 7, 205 (1993).

Davidse, J., and Koppe, R.P., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 86, 140 (1977).

Davis, T., Image Technology, 70, 254 (1988).

England, G., and Parker, A.K., Photogram. Engng., 38, 590 (1972).

Halas, J., Video, 8, 14 (August, 1982).

Goetz, A.F.H., Billingsley, F.C., Gillespie, A.R., Abrams, M.T., Squires, R.L., Shoemaker, E.M., Lucchitta, I., and Elston, D.P., Tech. Rep. 3L-1597 of the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California (1975).

Huck, F.O., and Wall, S.D., Appl. Optics, 15, 1748 (1976).

Judd, D.B., and Wyszecki, G., Color in Business Science and Industry, 3rd Edn., p.388, Wiley, New York (1975).

Laycock, J., Displays, p.3 (January, 1984).

Long, C., J. Soc. Mot. Pic.Tel. Eng., 91, 725 (1982).

Nakamura, J., and Kamakura, K., J. Soc. Mot. Pic. Tel. Eng., 90, 107 (1981).

Phillips, D.L., I.E.R.E. Publication No. 61, p.85 (1985).

Robertson, P.J., IBM Technical Report G320-6296 (1980).

Wheeler, L.J., Principles of Cinematography, 4th Edn., p.262, Fountain Press, England (1969).

Часть четвертая

ПОЛНОЦВЕТНАЯ ПОЛИГРАФИЯ

26 ФОТОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП

26.1 ВВЕДЕНИЕ

Обычно самым дешевым способом массового тиражирования цветовых репродукций является технология *краскопереноса* с некоей образцовой поверхности, несущей оригинальное изображение, на какую-либо весьма недорогую основу, например протравленную ткань, бумагу или желатиновую подложку фотопленок (для каждого следующего сеанса на оригинал вновь наносится краска). К примеру, технология *Technicolor* (см. разделы 12.2 и 12.11) построена на переносе голубого, пурпурного и желтого красочного изображений с желатиновых рельефных матриц на специально обработанный желатин. В текстильной промышленности, за исключением цельнотканых узоров, цветной рисунок печатается на полотне либо гравированными валами, специальным образом переносящими краску, либо термосублимационным способом со специальной бумаги, либо же за счет применения т.н. шелкографических трафаретов.

Рыночная ниша полиграфии — это производство большого числа экземпляров *недорогих* цветовых репродукций, таких как журналы, книги, афиши, этикетки, упаковки и пр.

Основные приемы цветовоспроизведения, которыми пользуется сегодняшняя трихроматическая полиграфия, базируются на технологии обыкновенных монохромных *высокой печати*, *литографской печати* и *глубокой печати* (см. рис. 26.1). Очевидно, что характеристики всех трех технологий удобнее дать на монохромном примере, а затем уже перейти к разговору о полноцветной полиграфии.

26.2 ВЫСОКАЯ ПЕЧАТЬ

Высокая печать — это метод, предназначенный к воспроизведению *литер* (о чем говорит его англоязычное название — «letterpress»). Практически все газеты, журналы и книги раньше печатались исключительно этим способом. Метод берет начало от ручной гравировки деревянных брусков: пробельными элементами такой печати являлись участки дерева, выбранные стамеской, а печатными — фрагменты нетронутой древесины. Прокатив по такой поверхности вал, покрытый краской, получали печатную форму, на которой нетронутое дерево принимало краску, а выбранные его участки оставались пустыми (рис. 26.2 [a]). Плотно прижав форму к бумаге, получали оттиск.

Наборный шрифт, в котором каждая литера гравировалась на отдельном маленьком брусочке, позволявший компоновать и перекомпоновывать эти брусочки в разной последовательности, формируя тексты, был придуман в Китае в X в., а затем, независимо от китайцев, в середине XV в. в Германии Иоганном Гутенбергом[1]. Однако именно с открытия Гутенберга принято вести историю высокой литерной печати.

---

[1] Иоганн Гутенберг (нем. Johannes Gutenberg, между 1397 и 1400, Майнц — 3 февраля 1468, Майнц). Изобретение Гутенберга приписывалось в разное время разным лицам. Истина окончательно восстановлена V. D. Linde («Gutenberg», 1878), многолетние изыскания которого подтверждаются новейшими находками в библиотеках и архивах. — *Прим. пер.*

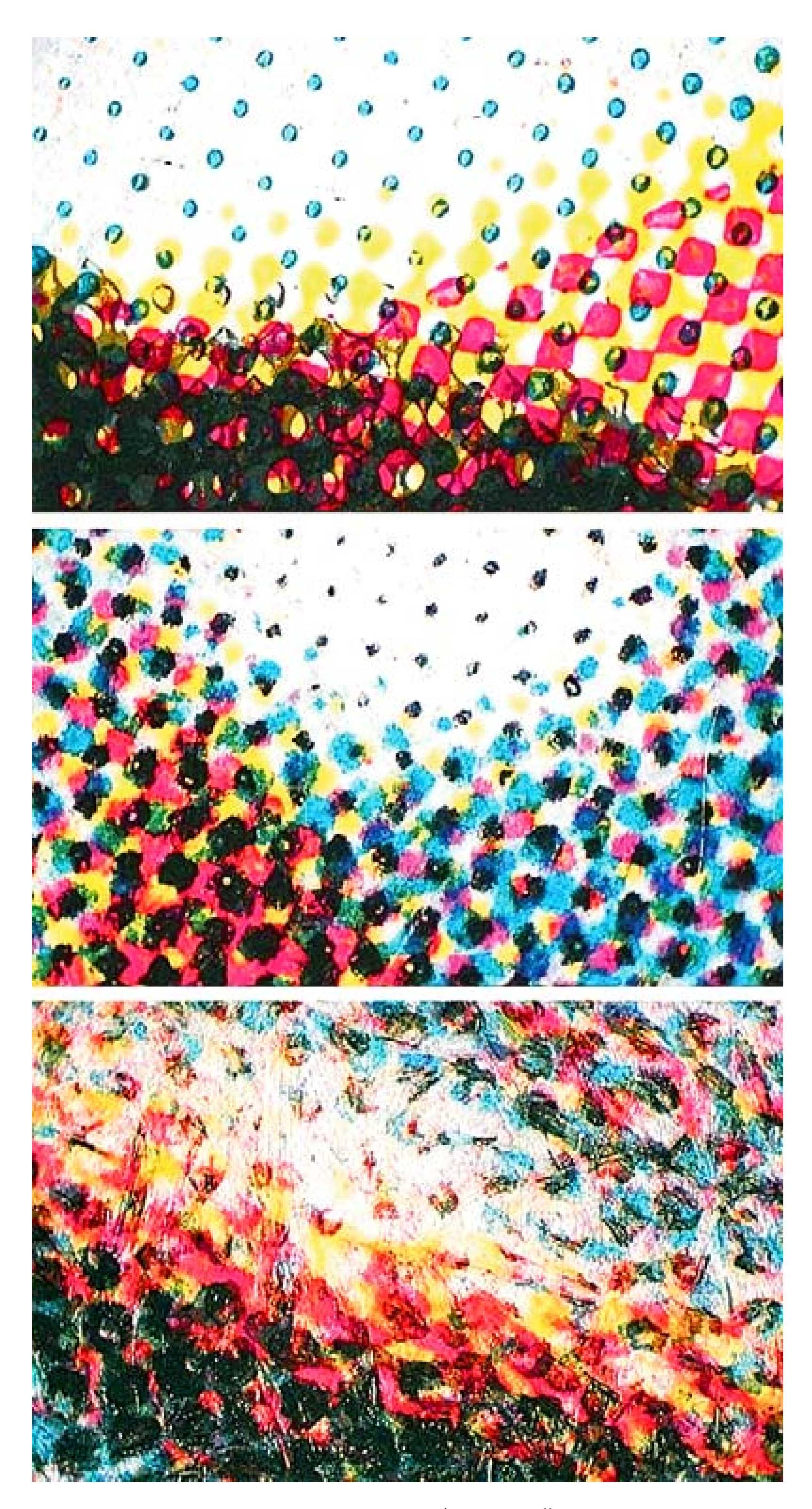


Рис. 26.1 Микрофотографии мелких участков изображений, отпечатанных методами четырехкрасочной высокой (*вверху*), литографской (*в центре*) и глубокой печати (*внизу*). Сильно увеличено.

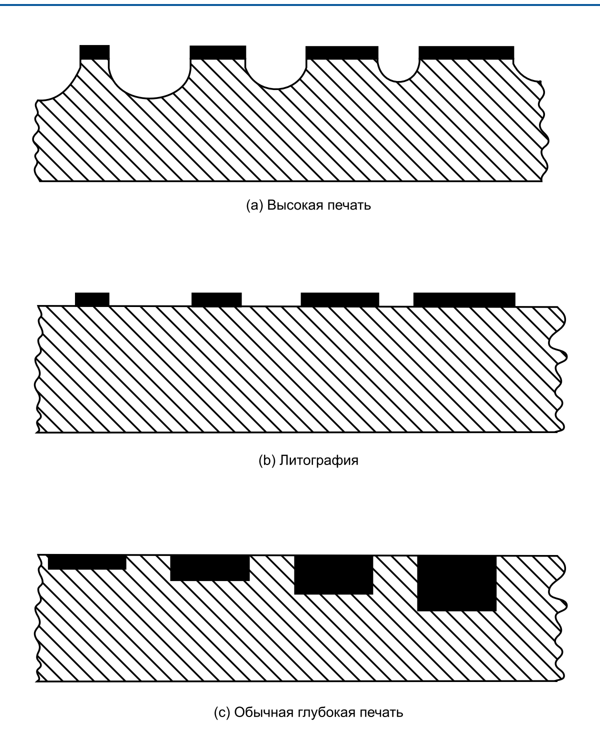


Рис. 26.2 Схематичное представление отличий между технологическими принципами высокой, литографской и глубокой печати. Печатные формы в разрезе после наноса краски.

Нетрудно догадаться, что системы высокой печати работали по принципу «все или ничего»: форма на разных участках оказывалась либо покрытой краской, либо нет, и, следовательно, в случае обычной черной краски, разные области оттиска оказывались либо черными, либо белыми, то есть система воспроизводила стимулы лишь двух вариантов — черного (краска) и белого (подложка). Безусловно, что для тиражирования текстов сие было идеально и отпечатанные страницы великолепно читались. Однако для печати черно-белых фотографий необходимо воспроизводить не только черные и белые стимулы, но и стимулы промежуточных яркостей, то есть серых тонов. Способ, которым эта задача решалась в высокой печати был на удивление оригинален и задействовал одно из психофизиологических свойств зрения, успешно эксплуатируемое мозаичными аддитивными процессами: мы знаем, что существует некий предел пространственного разрешения изображений, выше которого зрение перестает распознавать мелкие детали, в результате чего отдельные красный, зеленый и синий участки сливаются вместе, формируя стимулы практически всех возможных промежуточных яркостей и цветностей (см. раздел 3.3); высокая печать для воспроизведения серых стимулов создавала мозаику черных и белых точек, которую зрение воспринимает как серый стимул.

Дробления оригинального изображения на точки добивались путем фотографирования оригинала через т.н. *растр*,— приспособление, расположенное на небольшом расстоянии от эмульсии фотопластины или пленки. Растр состоял из двух стеклянных пластин, с нанесенными на них сверхтонкими непрозрачными линиями. Пластины плотно скреплялись друг с другом, причем так, что линии располагались под прямым углом, образуя квадратные ячейки (см. рис. 26.3 вверху). Об этих ячейках можно говорить как о неких примитивных «линзочках», образовывавших на пленке слегка расфокусированные «изображения» (см. рис. 26.3 снизу).

Фотопленку брали сверхвысококонтрастную, благодаря чему после ее проявки ре-

продуцируемое изображение оказывалось состоящим из черных точек и прозрачных промежутков между ними. Поскольку дырочные элементы ярких областей оригинала активировали большее количество зерен серебра, чем темные области, после обработки пленки светам оригинала соответствовали крупные черные точки, а теням — мелкие, и полученный негатив при сильном увеличении выглядел так, как показано на рис. 26.4. На участках негатива, соответствовавших высоким светам оригинала, точки оказывались настолько крупны, что порой сливались между собой.

Изображения растровой структуры (растрированные изображения) часто именуют *полутоновыми* (в противоположность изображениям *непрерывного тона*, или, как еще говорят, *безрастровым* или *контонным*), а растры, с которых эти изображения были получены, именуются *полутоновыми растрами* или *перекрестными растрами*. Растрирующие фотокамеры называются *репродукционными фотоаппаратами*, а получившиеся с их помощью негативы (или позитивы) — *растрированными*, *полутоновыми* или *точечными негативами* (или позитивами).

На следующем этапе фотомеханического процесса растрированный негатив копировался на медную или цинковую пластину, после чего пластина эта обрабатывалась так, что участки, соответствовавшие темным областям негатива (света оригинального изображения), вытравливались, а те, что соответствовали светлым, — оставались нетронутыми. Понятно, что после покрытия пластины слоем краски получалось позитивное точечное изображение (рис. 26.5), которое и оттискивалось на бумагу.

Напомним, что достаточно мелкий точечный растр *воспринимается* зрением как изображение непрерывного тона, аналогичное оригинальному. При постоянном просмотровом расстоянии лучше (по данному параметру) смотрится тот оттиск, на котором растровые точки мельче. Частота (мелкость) точечного растра определялась частотой растра репродукционного фотоаппарата и могла доходить до 300 линий на дюйм (120 линий на см). Однако изображения, растрированные с такой высокой частотой (или, как говорят, — *линиатурой*), к сожалению, могли воспроизводиться только на специальных особоглянцевых бумагах очень высокого качества, поэтому книги и журналы обычно печатались (и печатаются сегодня) с линиатурой порядка 133, 150 или 175 lpi (lines per inch — линий на дюйм), а газеты и того меньше — 65–100 lpi, из-за чего точечная структура газетных фотографий порой хорошо видна.

Кстати говоря, резкую потерю разрешающей способности зрения хорошо иллюстрирует плавное удаление наблюдателя от газетной фотографии: ее точечная структура пропадает очень быстро. Но если на расстоянии пропадания фотографию повернуть на 45° — растровая сетка снова становится заметной. Так происходит потому, что паттерн черно-белых точек на растрированных фотографиях исходно всегда повернут на 45° (см. рис. 26.3) и никогда не бывает строго вертикально-горизонтальным, поскольку зрение хуже всего различает мелкие детали при повороте на 45° (возможно, благодаря тому, что зрительная система человека в первую очередь реагирует на вертикальные и горизонтальные стимулы, а не на диагональные).

Итак, мы видим, что воспроизведение серых полутонов в высокой печати оказывалось весьма трудоемким и вело к разного рода тональным искажениям. Некоторые стимулы воспроизводились слишком темными, некоторые — слишком светлыми. Искусство адекватного тоновоспроизведения методом высокой печати заключалось главным образом в верном выборе выдержки и диафрагмы репродукционного фотоаппарата, правильном подборе расстояния между растром и фотопленкой, а также в оптимальном режиме обработки растрированного негатива. Несмотря на дополнительные

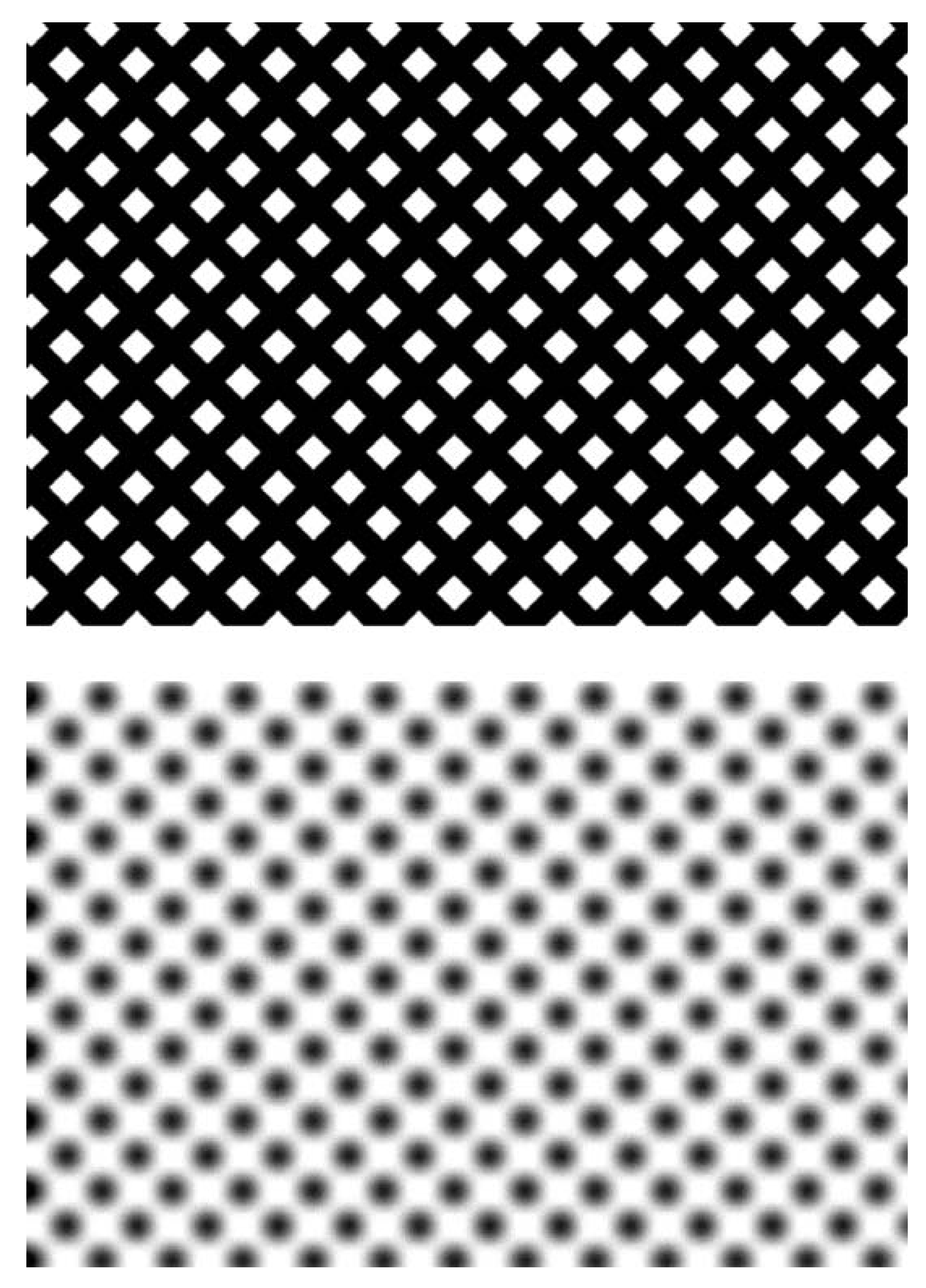


Рис. 26.3 *Вверху*: мелкий фрагмент стеклянного полутонового растра (сильно увеличено). *Внизу*: световая картина, возникающая, когда стеклянный полутоновый растр расположен на небольшом расстоянии от фотопленки. Так же выглядит контактный растр.

хлопоты и трудоемкость, особо значимые области изображений подвергались ручной коррекции (Bryngdahl, 1978).

26.3 ЛИТОГРАФИЯ

В литографском процессе промежуточные серые тона также воспроизводятся на базе физиологического эффекта слияния растровых точек разных размеров. Печатная форма при этом не рельефна, как в высокой печати, но совершенно плоская (см. рис. 26.2 [b]). На ранних этапах развития данной технологии, так же как и в высокой печати, использовался растрированный негатив, который затем копировался на форму, на которой специальная жиросодержащая краска удерживалась только в промежутках между точками, но не на самих точках (либо же наоборот: на форму копировался растрированный *позитив*, а краска при этом садилась на точки, но не удерживалась в промежутках между ними).

Принцип выноса жирной краски из пробельных участков построен на том, что участки эти обладают большей смачиваемостью, чем печатные элементы (растровые точки), поэтому форма перед накатом краски увлажняется. Таким образом, печатный цикл состоит из смачивания, наката краски и печати (затем вновь смачивания, наката, печати и т.д.).

Нетрудно догадаться, что технологичнее использовать вращающиеся цилиндры, нежели подвижные плоскости, поэтому красочное изображение вначале переносится с формы на резиновый вал, а уже потом на бумагу. Метод получил название *офсетной печати*.[1]

Наконец, отметим, что сегодня офсетная трихроматическая литография повсеместно вытеснила трихроматическую высокую печать.

26.4 ГЛУБОКАЯ ПЕЧАТЬ (ИНТАЛИЯ)

В отличие от высокой и офсетной печати, глубокая печать в своей классической форме воспроизводит промежуточные тона не за счет варьирования относительным размером черных точек и промежутков между ними, а за счет того, что в печатной форме имеются выемки (*ячейки*) разной глубины, заполненные краской, в то время как невыбранные участки формы свободны от нее (рис. 26.2 [c]). Темные, светлые и все промежуточные тона получаются за счет выноса на поверхность большего или меньшего количества краски, определяемого глубиной ячейки.

Как видим, системы глубокой печати не требуют растрирования, то есть дробления изображения на точки, но, с другой стороны, глубокой печати критично, чтобы пробельные (невыбранные) участки формы были абсолютно свободны от краски. Последнее достигается путем специальной очистки, следующей за наполнением всех ячеек.

К сожалению, в процессе чистки возникает паразитный вынос краски из крупных ячеек. Дабы уйти от этого, в них создается плотная сеть перегородок, для чего применяются опять же растры, причем довольно высокой линиатуры (обычно 175 lpi [70 линий на см]). Цель такого растрирования, как мы видим, принципиально отлична от цели растрирования в высокой печати и офсете, где тот или иной объект формируется из точек *переменного диаметра*: в традиционной глубокой печати диаметр всех «точек» неизменен на всех уровнях оптической плотности.

---

1 От английского «offset» — смещение, отвод. — *Прим. пер.*

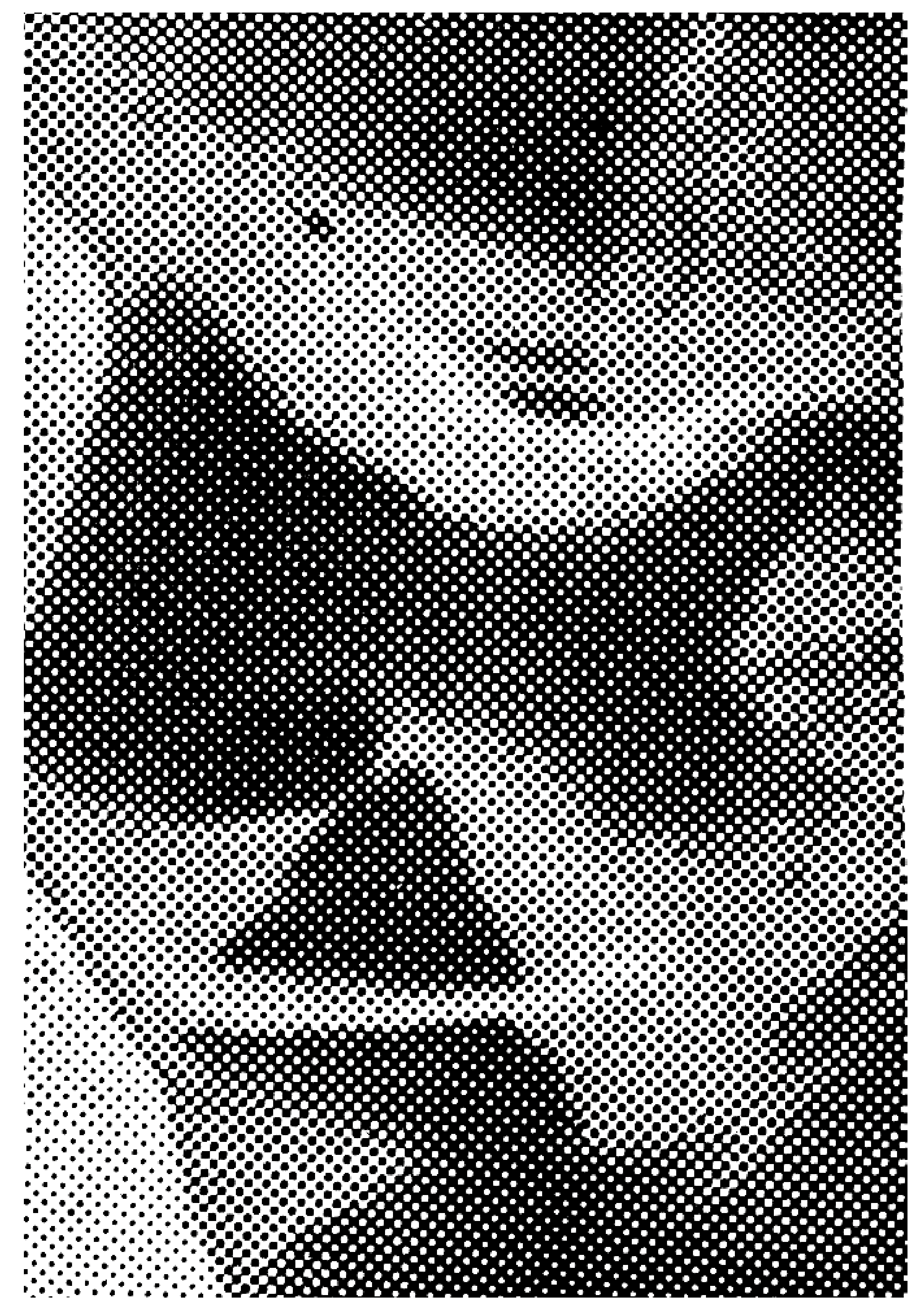


Рис. 26.4 Полутоновый негатив. Сильно увеличено.

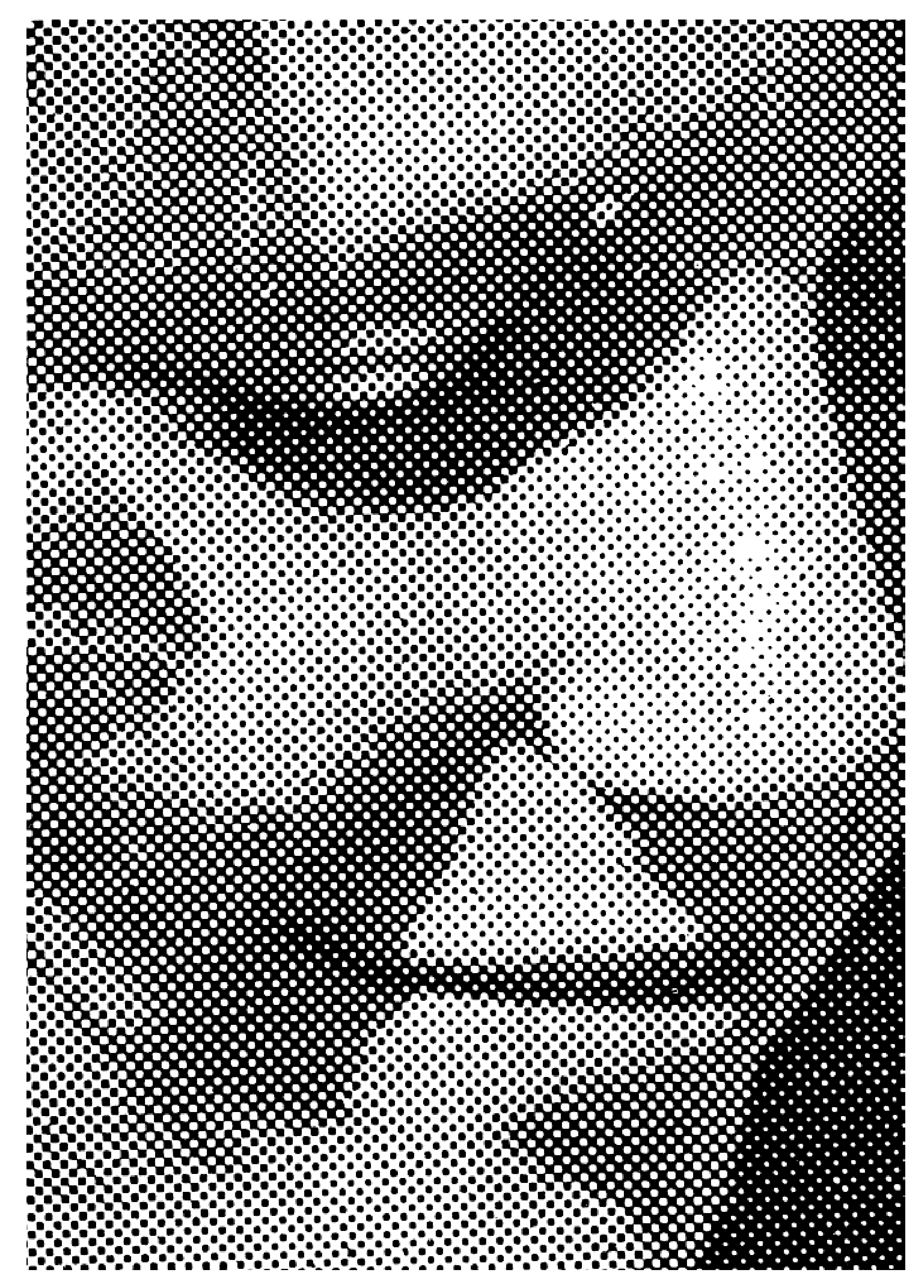


Рис. 26.5 Полутоновый позитив. Сильно увеличено.

В трихроматической глубокой печати имеют место сложности с регулировкой выноса краски из мелких ячеек, поэтому их диаметр меньше, чем диаметр всех остальных, что придает технологии некоторую схожесть с растровым полутоном высокой и офсетной печати.

Глубокая печать более всего подходит к работе с поверхностями среднего глянца, поскольку метод малопригоден к воспроизведению высококачественных изображений с высокой деталировкой (т.е. требующих высоких растровых линиатур, к примеру, 175 lpi). По этой причине глубокая печать активно применяется в производстве дешевых еженедельных журналов, где низкая стоимость издания не предполагает высокого качества бумаги, а высокая цена печатных валов «раскидана» на большое количество экземпляров. Применению глубокой печати в газетных публикациях препятствуют сложности с внесением изменений в тексты: печатные формы гравируются единожды и для каждого следующего номера требуется новый комплект форм. Методом глубокой печати часто изготавливаются денежные банкноты, поскольку технология в состоянии воспроизводить очень тонкие кривые линии, которые трудно подделать. Сегодня основной сферой применения глубокой печати являются этикеточное и упаковочное производства.

26.5 НАЛОЖЕНИЕ КРАСОЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Мы знаем, что в цветной фотографии используются три красочных изображения (голубое, пурпурное и желтое), наложенных друг на друга и точно совмещенных. В 18 главе мы говорили о микроскопической структуре таких изображений. Напомним, что черно-белые серебряные изображения, из которых в конечном счете получаются все цветные, состоят из мельчайших частиц восстановленного серебра — т.н. *зерен*. В некоторых гидротипных процессах, таких как *Technicolor*, *Kodak Transfer Process*, а также в системах *Polarcolor* и *Instant Kodak* (см. раздел 17.10), гранулярная структура исходного серебряного изображения (с которого и получалось цветное) за счет диффузии красителей практически полностью размывалась, т.е. процесс был в полном смысле субтрактивным. Однако с позиции визуальной резкости перенос красителей — нежелательный фактор, поэтому в большинстве субтрактивных процессов красители остаются в гранулярной форме, точно повторяя при этом структуру исходного серебряного изображения (как, скажем, в пленках *Kodachrome*), либо же слегка меняя ее за счет структурной специфики краскообразующих компонент (как, скажем, в пленках *Ektachrome* и *Kodacolor*) (см. рис. 12.4, 12.5 и 12.6, а также 18.1 и 18.9).

Неоднородность фотографических красочных изображений в целом незаметна, поэтому некоторые субтрактивные цветофотографические процессы даже обрели репутацию «беззернистых». Однако в сильный микроскоп хорошо видно, что цветное фотографическое изображение обладает т.н. *случайной структурой*, что также встречается в случайно-мозаичных аддитивных процессах (хотя гранулярность последних примерно в десять раз выше).

26.6 НАЛОЖЕНИЕ ТОЧЕЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Как было показано в предыдущем разделе, большинство субтрактивных фотографических изображений состоит из гранулярных красочных паттернов, положенных друг на друга. Успех цветной фотографии наводит на мысль, что в полиграфии адекватное цветовоспроизведение достигаемо простой последовательной печатью трех точечных

красочных изображений одно поверх другого (см. 26.7). Действительно, субтрактивное трихроматическое цветовоспроизведение в полиграфии строится на принципе, открытом еще в начале XVIII в. Жакобом Кристоффелем Леблоном (Birren, 1981): с трех сепарированных черно-белых негативов, выполненных за красным, зеленым и синим фильтрами, получают три точечных (растрированных) изображения и печатают их соответственно голубой (cyan), пурпурной (magenta) и желтой (yellow) красками. Такая практика распространена повсеместно, но при этом стоит заметить, что в профессиональной полиграфической лексике в отношении печатной триады часто употребляются термины «синий», «красный» и «желтый» (см. раздел 4.2).

Часто помимо трех красочных изображений в создании результирующего трихроматического оттиска участвует черное точечное изображение: оно необходимо, например, для получения на оттисках глубокого черного (поскольку суммарное количество красок на поверхности по ряду технологических причин ограничено), но также благодаря black-сепарации снижаются требования к точности приводки сепараций трихроматических и уменьшается паразитная хроматическая вариабельность в глубоких тенях изображений. Плюс к тому применение т.н. *метода GCR* (будет описан в разделе 29.14) позволяет уменьшить общий расход красок (см. рис. 29.7).

26.6.1 Углы поворота растров

Дабы избежать появления на оттисках т.н. *муара* — паразитных регулярных структур (интерферентов), инициируемых взаимоналожением параллельных рядов голубых, пурпурных и желтых точек, — растровые ряды точечных изображений всегда печатаются повернутыми на разные углы. При этом растр black-сепарации повернут на угол минимальной различимости — 45°, cyan-сепарации — на 30° от черного, magenta-сепарации — на 30° в противоположную сторону от черного, а yellow-сепарации (точки которой менее всего заметны) на угол, занимающий серединное положение между углом голубого и углом пурпурного — то есть 0° (вертикально) или 90° (горизонтально) (см. рис. 26.6).

Напомним, что в традиционной глубокой печати изображение не дробится на точки переменного размера, и поскольку гранулы оригинального серебряного изображения слишком мелки, чтобы проявить себя на финальном оттиске, процесс более всего походит на истинно субтрактивный, то есть аналогичен фотографическим краскотрансферным процессам. Однако характер цветовоспроизведения в высокой и офсетной печати лежит где-то между собственно субтрактивным и мозаично-аддитивным.

Сканеры, о которых речь пойдет в гл. 29, тоже дают возможность «заполнять» запечатываемую поверхность краской в разных пропорциях, но варьируют не диаметром растровых точек (как показано на рис. 26.4 и 26,5), а плотностью залегания на единицу площади случайно (или, как говорят, — *стохастически*) распределенных микроточек. Размер последних в этом случае равен примерно одной десятой от размера обычной растровой точки, соответствующей 50% заполнения поверхности. Преимущество техники стохастического растрирования состоит в том, что разрешение результирующего изображения повышается, а визуальная различимость его точечной структуры — понижается. При этом, однако, за счет эффекта т.н. *случайной агрегации* микроточек растет визуальная зернистость результирующих изображений.[1]

---

[1] Современные алгоритмы стохастического растрирования позволяют уйти от этого нежелательного явления. — *Прим. пер.*

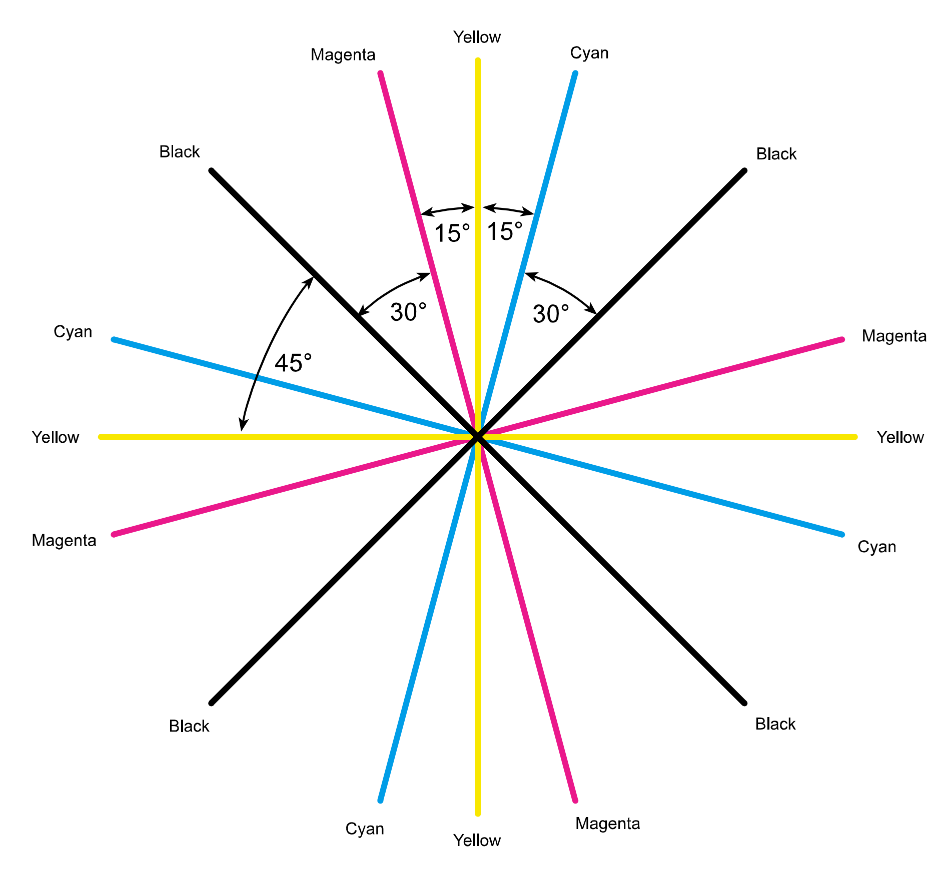


Рис. 26.6 Углы поворота растров, обычно применяемые в четырехкрасочной печати.

26.7 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ТОЧЕЧНЫМИ ИЗОБРАЖЕНИЯМИ

Суперпозиция голубого, пурпурного и желтого точечных (растрированных) изображений дает мозаику восьми возможных цветовых стимулов:

— ахроматического белого в промежутках между растровыми точками;

— ахроматического черного, в местах наложения трех точек друг на друга;

— голубого, пурпурного и желтого, каждый из которых виден в просветах между точками двух других;

— красного, зеленого и синего, образованных парами точек двух колорантов (т.н. бинарами), видимыми в просветах между точками третьего (рис. 26.1).

В 1937 г. американский физик (немец по происхождению) Ганс Нойгебауер в своей «Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbenbuchdrucks» предложил (в общем виде) решение проблемы цветовоспроизведения на основе восьмистимульной мозаики.

Пусть в некоей трехкрасочной системе (голубой, пурпурный и желтый) величина c — это доля покрытия запечатываемой поверхности (чаще всего бумаги) cyan-точками; m — доля покрытия magenta-точками и y — доля покрытия yellow-точками на единицу площади поверхности. Из этого следует, что $(1 - c)$ — это доля непокрытия cyan-точками; $(1 - m)$ — доля непокрытия magenta-точками, $(1 - y)$ — *yellow*-точками на единицу площади поверхности.

Вероятность того, что тот или иной участок поверхности окажется покрытым cyan-точкой, равна c, magenta-точкой — m, yellow-точкой — y. Следовательно, вероят-

ность, что тот или иной участок поверхности окажется запечатанным всеми тремя красками, то есть станет черным, равна произведению этих вероятностей — $c \times m \times y$. Аналогичным образом рассчитываются вероятности непокрытия любой из трех красок любого участка поверхности — $(1 - c)$, $(1 - m)$, $(1 - y)$. Таким образом, по белому выражение выглядит как $(1 - c)\times(1 - m)\times(1 - y)$. Аналогичным путем можно написать выражения по каждому из восьми стимулов (символы в скобках — это трехстимульные CIE XYZ-значения каждого стимула):

$$\begin{array}{llll}
(X_1, Y_1, Z_1) & \text{Белый} & (1-c)(1-m)(1-y) & = f_1 \\
(X_2, Y_2, Z_2) & \text{Голубой} & c(1-m)(1-y) & = f_2 \\
(X_3, Y_3, Z_3) & \text{Пурпурный} & m(1-c)(1-y) & = f_3 \\
(X_4, Y_4, Z_4) & \text{Желтый} & y(1-c)(1-m) & = f_4 \\
(X_5, Y_5, Z_5) & \text{Красный} & my(1-c) & = f_5 \\
(X_6, Y_6, Z_6) & \text{Зеленый} & cy(1-m) & = f_6 \\
(X_7, Y_7, Z_7) & \text{Синий} & cm(1-y) & = f_7 \\
(X_8, Y_8, Z_8) & \text{Черный} & cmy & = f_8
\end{array}$$

Теперь предположим, что у нас имеется оригинальный стимул P, трехстимульные значения которого равны $X_p Y_p Z_p$. Колориметрическое репродуцирование этого стимула предполагает, что колориметрически эквивалентный стимул (т.е. оказывающий на зрительную систему наблюдателя точно такое же воздействие, что и стимул оригинальный) будет иметь те же трехстимульные значения — $X_p Y_p Z_p$. Данное требование очень просто записать математически, исходя из грассмановского принципа аддитивности (см. раздел 7.4):

$$f_1 X_1 + f_2 X_2 + f_3 X_3 + f_4 X_4 + f_5 X_5 + f_6 X_6 + f_7 X_7 + f_8 X_8 = X_p$$
$$f_1 Y_1 + f_2 Y_2 + f_3 Y_3 + f_4 Y_4 + f_5 Y_5 + f_6 Y_6 + f_7 Y_7 + f_8 Y_8 = Y_p$$
$$f_1 Z_1 + f_2 Z_2 + f_3 Z_3 + f_4 Z_4 + f_5 Z_5 + f_6 Z_6 + f_7 Z_7 + f_8 Z_8 = Z_p$$

По нашему образцу имеем f_1 единиц белого и f_2 единиц голубого, что вместе дает:

$$f_1 \text{ единиц белого} \equiv f_1 X_1(X) + f_1 Y_1(Y) + f_1 Z_1(Z)$$
$$f_2 \text{ единиц голубого} \equiv f_2 X_2(X) + f_2 Y_2(Y) + f_2 Z_2(Z)$$

Коль скоро f_1 единиц белого аддитивно смешаны с f_2 единиц голубого, то сие эквивалентно:

$$(f_1 X_1 + f_2 X_2)(X) + (f_1 Y_1 + f_1 Y_1)(Y) + (f_1 Z_1 + f_1 Z_1)(Z)$$

И так далее по всем оставшимся стимулам.

Следовательно, линейные коэффициенты переменных (X), (Y) и (Z) у аддитивной смеси всех восьми стимулов будут представлять собой левые части каждого из приведенных выше трех уравнений. Если коэффициенты эти идентичны X_p,Y_p и Z_p, колориметрическое цветовоспроизведение будет выполнено.

Поскольку приведенная выше тройка уравнений — это реальные уравнения для c, m

и y, то, при условии, что величины X_1, Y_1, $Z_1...X_8$, Y_8, Z_8, а также, разумеется, X_pY_p и Z_p — известны, эти уравнения можно решить для c, m и y. Значения c, m и y — это удельные площади запечаток красками, которые нужны для репродуцирования оригинального стимула P. Следовательно, если оригинальные стимулы анализируются в логике их трехстимульных значений X, Y и Z, все соответствующие значения c, m и y рассчитаны и, наконец, каждая точка поверхности запечатана в соответствии с этим расчетом, то колориметрическая копия оригинального изображения будет успешно воспроизведена.

Несмотря на очевидную сложность описанной процедуры, американские исследователи А. Гарди и Ф. Вурцбург (Hardy и Wurzburg, 1948) разработали метод практической реализации принципа Нойгебауера (что будет описано в гл. 29.2).

Безусловно, некоторые оригинальные стимулы могут оказаться колориметрически чересчур чистыми для того, чтобы их можно было уравнять с помощью фактических красок, и в этом случае одно (или более) из расчетных c-, m- и y-значений окажутся отрицательными. Поскольку нанести на поверхность отрицательное количество краски невозможно, то лучшее, что можно предпринять в этом случае, — это вообще не наносить соответствующую краску на те участки изображения, что требуют ее отрицательного количества. Понятно, однако, что сие неизбежно приведет к серьезным погрешностям в цветовом тоне и чистоте цвета воспроизводимых стимулов.

Разумеется, Гарди и Вурцбург рассмотрели также и четырехкрасочную печать, задействующую наряду с триадным комплектом еще и черную краску (Hardy и Wurzburg, 1948).

Уравнения Нойгебауера предполагают, что в воспроизведении цветовой репродукции участвуют только восемь стимулов. Однако бо́льшая часть света, упавшего на мелкие красочные точки, рассеивается по сторонам и заполняет пространство между этими точками. Если точки крупные, бо́льшая часть упавшего света проходит сквозь краску, причем дважды: сначала сквозь красочный слой до поверхности, например, бумаги, после чего, отразившись от нее, — назад, сквозь красочный слой (возможны также и множественные проходы — см. разделы 13.9 и 30.7). Следовательно, стимулы, инициированные растровыми точками, будут колориметрически разниться в зависимости от своего диаметра. Объективный анализ ситуации в этом случае неизбежно требует учета эффектов светорассеяния, что выполнимо только спектрометрически (Shiraiwa и Mizuno, 1993).

26.8 ЦВЕТОКОРРЕКЦИЯ МАСКИРОВАНИЕМ

Несмотря на то что метод Гарди и Вурцбурга математически изящен и теоретически обоснован, он, к сожалению, непрактичен и требует выполнения длительных и кропотливых вычислений по каждому изображению. Следовательно, мы должны рассмотреть простые способы повышения качества цветовоспроизведения, позволяющие избежать утомительной процедуры пересчетов по отдельным областям запечатываемой поверхности. К таким способам относилось маскирование, выполнявшееся либо вручную, либо при помощи сканеров. К примеру, американский исследователь Ф. Поллак, сделав ряд допущений в отношении характера красок, решил уравнения Нойгебауера и, основываясь на этом решении, получил довольно простую и надежную систему маскирования (Pollak, 1955; Nonaka и Isoda, 1999). Однако же несмотря на все усилия исследователей, методы маскирования, применявшиеся в реальной практике, оставались по большей части сугубо эмпирическими. Некоторые из них мы опишем в гл. 28, а в гл. 29 дадим приемы маскирования с помощью сканеров.







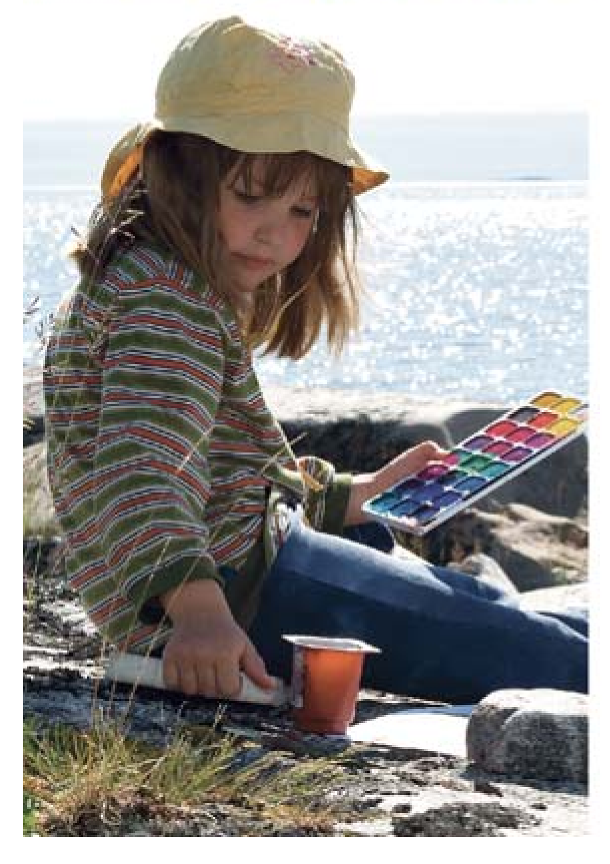


Рис. 26.7
Вверху: отдельные оттиски голубой, пурпурной, желтой и black-сепараций обычной офсетной четырехкрасочной печати.
Внизу: левое изображение — результат печати голубого, пурпурного и желтого изображений без черного; отметим, что триадные краски в смеси дают весьма посредственный «черный», что хорошо видно в сравнении с центральным нижним изображением, в котором присутствуют четыре краски (триада плюс черный). Правое нижнее изображение — результат четырехкрасочной печати без маскирования (см. гл. 28): хорошо видно, что отсутствие коррекци паразитных поглощений ведет к падению насыщенности элементов репродукции.

Наконец отметим, что можно всерьез говорить о применимости теории контонного маскирования, описанной в гл. 15, к полутоновым (растрированным) изображениям. Такой разговор включает в себя тезисы об аддитивности полутоновых оптических плотностей и о необходимости применения масок с нелинейными характеристиками (Pollak, 1955 и 1956; Yule и Clapper, 1955; Preucil, 1953; Pollak и Hepher, 1956).

26.9 КОНТАКТНЫЕ РАСТРЫ

Одним из важнейших полиграфических приспособлений прошлого являлся т.н. *контактный растр* (Yule, Johnston и Murray, 1942). Сразу отметим, что в практике глубокой печати тоже участвовал (и участвует) растр, но функция его лишь в том, чтобы предотвратить вымывание краски из крупных ячеек печатной формы. Однако же в высокой печати и офсете полутоновый растр впечатывался на фотопленку специально для того, чтобы раздробить изображение на точки переменного диаметра.

При данных экспозиционных параметрах классический стеклянный растр, удаленный от поверхности фотопленки на определенное расстояние, дает некую световую картину. Если фотопленка, экспонированная при этих условиях, обрабатывается не в высококонтрастном, а в стандартном проявителе, то позитив, полученный с нее, представляет собой более или менее достоверную фотографическую запись этой картины. Теперь, если полученный «фотографический растр» контактно закрепить на фотопленке (а исходный стеклянный растр, разумеется, удалить), то при экспонировании равномерным светом «фотораструр» организует на пленке почти такую же световую картину, какую дал бы растр стеклянный.

Изображение контактного растра дано в нижней части рис. 26.3: мы видим, что в отличие от «классического» стеклянного полутонового растра контактный растр имеет в каждой растровой точке определенный градиент оптических плотностей.

На первый взгляд, у метода контактного растрирования не было очевидных преимуществ перед растрированием с помощью растра стеклянного, но некоторые все же стоит отметить.

Во-первых, изготовление стеклянного растра — весьма трудоемкая и дорогостоящая процедура, тогда как с одного стеклянного растра, используемого в качестве т.н. *мастер-растра*, можно получать множество контактных.

Во-вторых, поскольку контактный растр находился в непосредственном плотном контакте с фотопленкой, мелкие детали изображения воспроизводились лучше. При использовании стеклянного растра (который, напомним, располагали на определенном удалении от фотоматериала), тонкие сплошные линии могли воспроизвестись только в виде цепочки точек относительно круглой или квадратной формы. При использовании контактного растра длинные тонкие линии воспроизводились тоже в виде цепочки точек, но каждая из них была вытянута в направлении хода линии, таким образом, репродукция этих линий была аккуратнее и с меньшим числом разрывов (Hepher, 1953), что иллюстрирует рис. 26.8.

В-третьих, изготовив контактный растр не на черно-белой, а на специальной пленке, дающей magenta-красочное изображение, получали весьма простой и удобный способ регулировки гамма тонопередачи результирующего черно-белого полутонового оттиска, либо же черно-белой сепарации четырехкрасочного трихроматического оттиска (последнее управляло гамма четырехкрасочной цветовой репродукции). В самом деле: если magenta-растр рассматривать через красный фильтр, то, поскольку magenta-краситель почти не поглощает длинноволновый (красный) свет, растровый

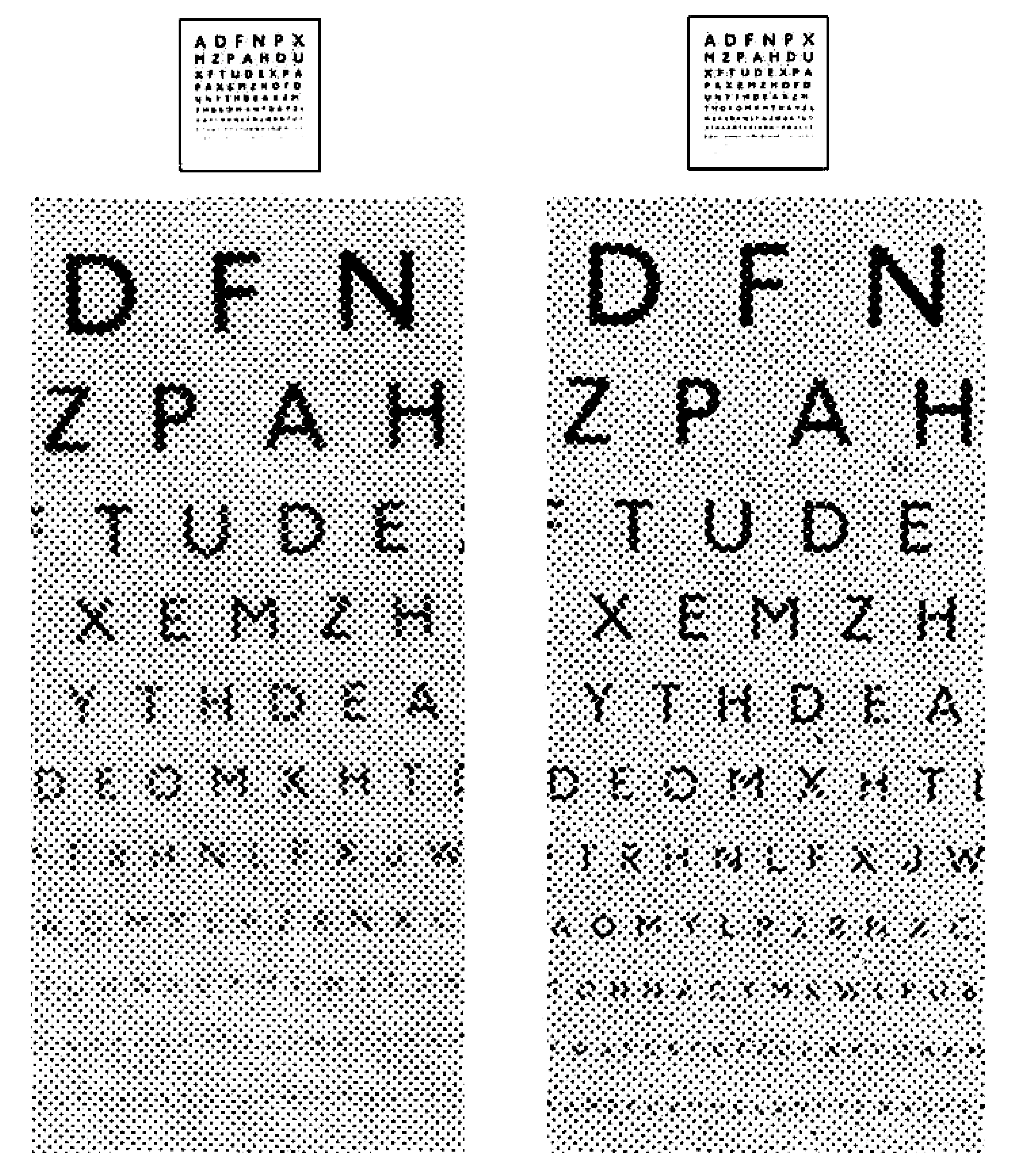


Рис. 26.8 *Вверху*: мелкое изображение офтальмологической карты, воспроизведенное с помощью традиционного линейчатого растра (слева) и с помощью контактного растра (справа). *Внизу*: сильно увеличенные микрофотографии одного и того же фрагмента верхних изображений. Хорошо видно, что контактный растр лучше воспроизводит мелкие детали благодаря меньшему дроблению линий на точки.

паттерн становится практически невидимым. Если на magenta-красочный растр посмотреть через синий фильтр, то благодаря поглощению в коротковолновой части спектра (которое имеет место у всех magenta-красителей) растровый паттерн станет выглядеть низкоконтрастным по каждой растровой точке. Если magenta-красочный растр рассматривать через зеленый фильтр, то, поскольку magenta-краситель погло-

щает средневолновый (зеленый) свет в большом количестве, растр обретает максимум своей фотографической (контонной) контрастности.

Когда magenta-красочный растр работал в связке с ортохроматической фотопленкой, чувствительность которой примерно одинакова как к коротковолновому, так и к средневолновому свету, гамма полутонового оттиска становилась управляемой за счет варьирования спектральным составом экспонирующего света от преимущественно коротковолнового до преимущественно средневолнового, проще говоря — от синего до зеленого.

Среднюю гамма получали, применяя сине-зеленый фильтр (либо пустив часть экспонирующего света через синий фильтр, а часть — через зеленый). Однако же, поскольку ортохроматические пленки нечувствительны к длинноволновому свету, то на практике вместо синего активно использовался magenta-фильтр, а вместо зеленого — желтый. Более того: пурпурный и желтый фильтры в целом даже предпочтительнее, так как обладают максимальной пропускательной способностью.

Особенность описанной системы, как видим, состоит в том, что экспозиция зеленым светом давала меньшую полутоновую гамма, чем экспозиция синим. Для простоты понимания обратимся к рис. 26.9, на верхнем графике которого дан градиент оптических плотностей некоего ряда растровых точек при экспозиции пленки зеленым светом, на нижнем графике — при экспозиции синим светом. Также отмечены уровни экспозиции (E_1 и E_2) и результирующие диаметры растровых точек (d_1 и d_2). Хорошо видно, что менее контрастный контактный растр (полученный экспозицией синим светом) дает больший разнос между диаметрами растровых точек ($d_1 - d_2$) при данной разнице в экспозициях ($E_1 - E_2$). Следовательно, экспозиция синим светом обеспечивает бóльшую полутоновую контрастность (бóльшую гамма), чем экспозиция зеленым.

Столь простой способ управления гамма полутоновых изображений долгое время служил весьма ценным инструментом управления результатами печати, и умелое его применение давало ощутимый прирост качества изображений.

Несмотря на всю простоту и эффективность управления полутоновой гамма за счет magenta-красочных растров, широкое распространение получил *серый контактный растр*, при использовании которого управление гамма осуществлялось с помощью т.н. *флэшинга* — принудительного частичного экспозиционного подсвечивания фотопленки равномерным светом. Когда требовалось изготовить сепарации путем т.н. *прямого растрирования* цветных оригиналов (см. раздел 28.6), magenta-растр не применялся, и в связке с высококонтрастными панхроматическими пленками использовался gray-растр.

В-четвертых, преимущество контактного растрирования состояло в том, что света изображений воспроизводились с несколько большей гамма и, следовательно, усиливались их субъективная яркость и чистота цвета. Так происходило потому, что в тех участках растра, что отвечают за передачу светов, растрированный позитив имел максимум пропускания и, следовательно, очень низкую контрастность, что, разумеется, повышало гамма полутоновой репродукции в светах. Сказанное проиллюстрирует рис. 26.9, на котором две световых экспозиции — E_3 и E_4— хоть и очень схожи друг с другом, однако дают выраженный разнос диаметров растровых точек ($d_3 - d_4$).

В-пятых, еще одно преимущество контактного растрирования — возможность выполнения его в вакуумной копировальной раме или рамке фотоувеличителя, т.е. без помощи репродукционного фотоаппарата (если не предполагалось масштабирования оригинального изображения).

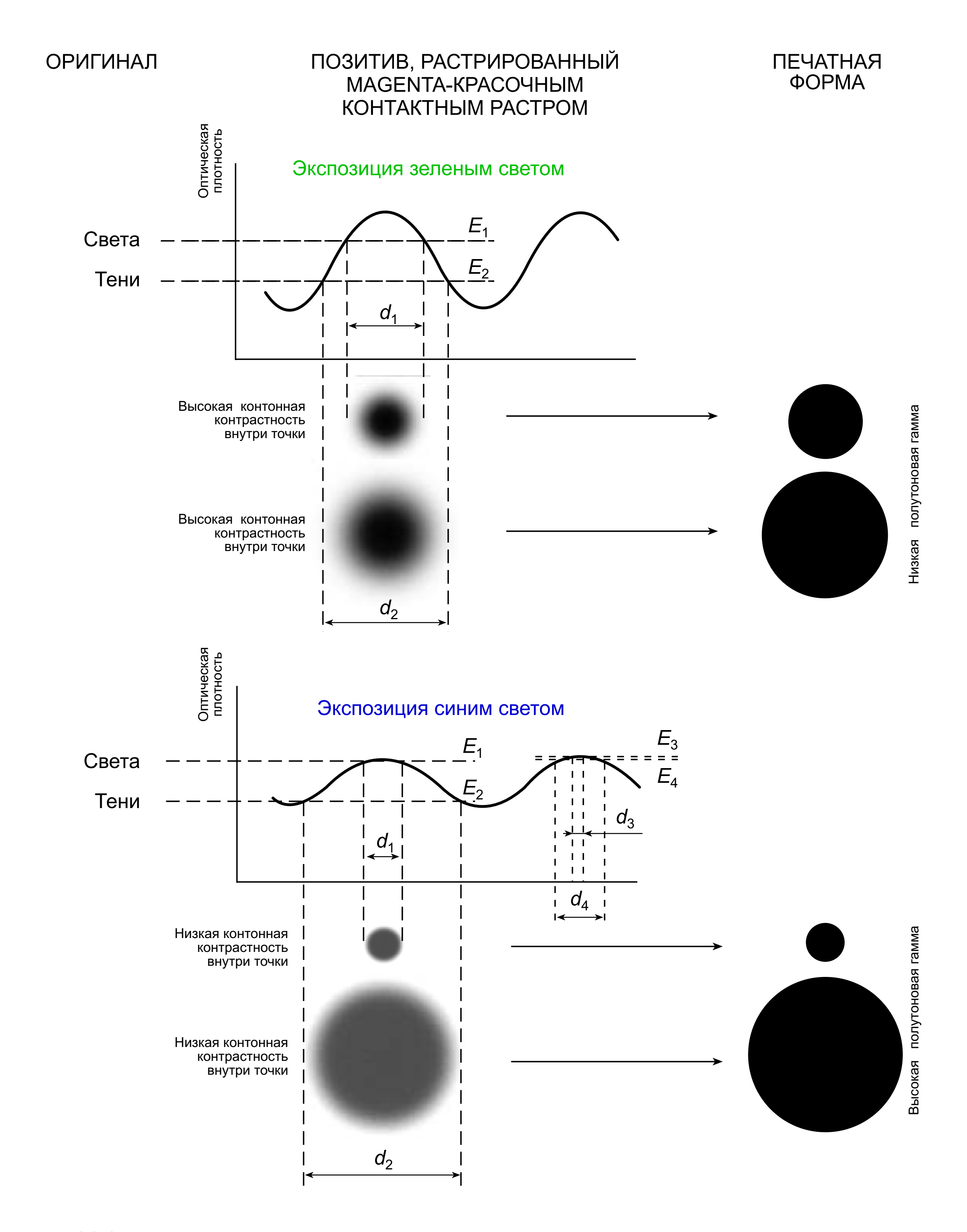


Рис. 26.9 Управление гамма полутоновых оттисков с помощью magenta-красочного контактного растра. *Вверху*: экспозиция фотопленки зеленым светом через magenta-красочный растр дает бóльшую фотографическую (контонную) контрастность растровых точек изображения, но меньшую полутоновую гамма печатной формы и, следовательно, меньшую гамма оттиска. *Внизу*: экспозиция синим светом дает меньшую фотографическую (контонную) контрастность растровых точек изображения, но большую полутоновую гамма печатной формы.

26.10 САМОРАСТРИРУЮЩАЯСЯ ФОТОПЛЕНКА

Еще одним весьма любопытным полиграфическим приспособлением являлась т.н. *саморастрирующаяся фотопленка* (Yule и Maurer, 1954). Фотографическая чувствительность такой пленки была непостоянной по полю, то есть менялась сообразно распределению света в полутоновом растре. Следовательно, саморастрирующаяся пленка позволяла создавать полутоновые (растрированные) изображения, не требуя при этом от оператора навыков работы со стеклянными или контактными растрами (Maurer, 1956). Однако при трихроматической печати необходимость поворота растровых сеток сепараций на разные углы создавала серьезные неудобства.

26.11 ЦВЕТНОЕ ФОТОКОПИРОВАНИЕ

Огромное количество монохромных фотокопий сегодня изготавливается методом *электрофотографии*: с поверхности, несущей изображение в виде паттерна электростатических зарядов, черный пигмент селективно переносится на обыкновенную офисную бумагу. Имея три таких изображения, каждое из которых несет трихроматическую информацию об оригинале, и выполнив с них последовательный перенос на поверхность соответственно голубого, пурпурного и желтого тонеров, получаем цветовую репродукцию этого оригинала. Однако тон-репродукционные параметры большинства цветных электрофотографических копиров (равно как и монохромных) оставляют желать лучшего, а цветовые репродукции высокого качества с помощью этих устройств можно получить только при помощи специальных методик (см. гл. 33).

Методики эти относятся к категории т.н. *прямых цифровых технологий* печати, в которых цифровые сигналы используются с целью непосредственного (прямого) создания цветных изображений электрофотографическим путем, т.е. минуя стадии промежуточных изображений на фотопленках или печатных поверхностях (см. гл. 30). Весьма полезной особенностью этих технологий является то, что каждая копия может являться сугубо индивидуальной, к примеру: в тираже некоего торгового каталога у всех экземпляров при прочих равных могут быть разные заголовки, ориентированные на разных заказчиков. Примерами прямых цифровых технологий могут служить системы *Indigo* (использующая лазерное экспонирование и жидкие тонеры) и *Xeikon* (светодиодное экспонирование и порошковые тонеры).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Birren, F., Color Res. Appl., 6, 85 (1981).
Bryngdahl, O., J. Opt. Soc. Amer., 68, 416 (1978).
Hardy, A.C., and Wurzburg, F.L., J. Opt. Soc. Amer., 38, 300 (1948).
Hepher, M., Penrose Annual, 47, 116 (1953).
Maurer, R.E., Penrose Annual, 50, 97 (1956).
Neugebauer, H.E.J., Z. Tech. Phys., 36, 22 (1937).
Nonaka, M., and Isoda, M., J. Imaging Sci. & Tech. 43, 120 (1999).
Pollak, F., J. Phot. Sci., 3, 180 (1955).
Pollak, F., J. Phot. Sci., 4, 65 (1956).
Pollak, F., and Hepher, M., Penrose Annual, 50, 106 (1956).
Preucil, F., Tech. Assoc. Graphic Arts, 5, 102 (1953).
Shiraiwa, Y., and Mizuno, T., J. Imaging Sci. Tech., 37, 385 (1993).
Yule, J.A.C., and Clapper, F.R., Tech. Assoc. Graphic Arts, 7, 1 (1955).

Yule, J.A.C., Johnston, F.B., and Murray, A., J. Franklin Inst., 234, 567 (1942).
Yule, J.A.C., and Maurer, R.E., Penrose Annual, 48, 93 (1954).

ЛИТЕРАТУРА

Cartwright, H.M., Ilford Graphic Arts Manual, Ilford, London (Vol. 1, 1961; Vol. 2, 1966).
Field, G.G., Color and its Reproduction, 2nd Edn., GATF Press, Pittsburgh (1997).
Gamble, C. W., Modern Illustration Processes, Pitman, London (1953).
Mortimer, A., Colour Reproduction in the Printing Industry, PIRA, Leatherhead (1991).
Smith, W.J., Turner, E.L., and Hallam, C.D., Photo Engraving in Relief, Pitman, London (1932).
Yule, J.A.C., Principles of Color Reproduction, Wiley, New York (1967).

27 ДОПЕЧАТНАЯ ОБРАБОТКА ОРИГИНАЛОВ

27.1 ВВЕДЕНИЕ

Обычно в редакционные отделы издательств «оригиналы» поступают из разных источников. Изредка, конечно, используются и собственно авторские работы, но чаще всего в роли «оригиналов» выступают цветные слайды, негативы, отражающие отпечатки, а в последнее время — файлы цифровых фотокамер. И хотя все перечисленные варианты сами по себе уже являются репродукциями тех или иных сцен, термин «оригинал» широко применяется в отношении *изображений*, предназначенных к печатному тиражированию, и поэтому в дальнейшем будет употребляться нами без кавычек.

При печати оригиналы часто подвергаются разного рода изменениям: порой репродуцируется лишь фрагмент оригинального изображения, а иногда тиражируется коллаж, состоящий из нескольких оригиналов или их фрагментов (что часто встречается в рекламе).

Если оригиналы представляют собой слайды или негативы, они чаще всего требуют определенной коррекции, приводящей их тональный и хроматический балансы к неким единым значениям, либо к некоему стандарту, задаваемому цветорепродукционной системой. Отражающие оригиналы тоже порой нуждаются в коррекции, хотя исходно они чуть менее вариабельны.

Итак, дабы при столь широком диапазоне входных параметров привести восприятие будущей репродукции к определенной визуальной однородности, на стадии изготовления сепарированных негативов требовались разного рода коррекции. Как будет показано в следующих двух главах, коррекции, в частности маскирование, выполнявшиеся на стадии сканирования, оказывались самодостаточными, особенно когда на одном печатном листе издания воспроизводилось одно изображение. Однако чаще всего на печатный лист заверстывалось несколько изображений, и в этом случае индивидуальная коррекция каждого изображения оказывалась весьма трудоемкой и дорогостоящей.

Если оригинальное изображение представляет собой набор электрических сигналов (самый распространенный сегодня случай), все необходимые коррекционные манипуляции выполняются с помощью компьютера и под контролем калиброванного цветного монитора (см. гл. 29). Целевое назначение компьютерных программ обычно очень схоже с назначением традиционных фотографических процедур, которые, как исторические и смысловые предшественники современных цифровых технологий в полиграфии, будут рассмотрены нами в текущей и в нескольких последующих главах.

27.2 КОНТРАТИПИРОВАНИЕ И КОНВЕРСИЯ ОРИГИНАЛОВ

Если возникала необходимость заверстать изображения, полученные с разных оригиналов, на общий печатный лист, то прежде выполнялись процедуры *контратипирования* (*дуплицирования*) и/или *конверсии* в слайд каждого оригинального изображения. Процедуры эти были ориентированы на получение в требуемом пространственном размере корректных прозрачных копий (слайдов или отражающих отпечатков соответственно). Полученные *вторичные оригиналы* заверстывались затем на печатный лист, после чего либо путем маскирования (см. гл. 28), либо на стадии барабанного сканирования изготавливались сепарированные негативы всего печатного листа — *печатные сепарации* (см. гл. 29).

Главным преимуществом описанной процедуры являлась возможность выполнения общей визуальной оценки будущих оттисков на ранних стадиях процесса. Плюс к тому метод снижал себестоимость работ.

Когда требовалось заверстать на печатный лист слайды край в край, отдельные кадры монтировались по длиннику в стык, либо же неэкспонированные фрагменты пленки удалялись, а собственно слайд-изображения монтировались на прозрачной основе. Отметим, что, в частности, при барабанном сканировании, требовался «гладкий», аккуратный монтаж слайд-оригиналов.

Работа с отражающими оригиналами была, безусловно, проще, но при работе с барабанными сканерами обязательным условием являлась механическая гибкость этих оригиналов.

Прочими преимуществами использования вторичных оригиналов (т.е. контратипов оригиналов первичных) являлись следующие:

— дополнительные комплекты вторичных оригиналов можно было отправлять на разные печатающие устройства, к примеру, одно и то же рекламное изображение тиражируемо разными технологическими способами: глубокой печатью — в цветном бульварном журнале, офсетом — на уличном плакате, высокой печатью — на картонной упаковке;

— существенная экономия монтажной пленки, поскольку печатные сепарации изготовливались с готового спускового макета, а не с каждой отдельной страницы.

Работа по стандартизированным репродукционным схемам облегчалась за счет копирования на фотопленку (или фотобумагу) всех имеющихся первичных оригиналов, что позволяло избежать трудностей, вызванных разным составом красителей в слайд-пленках и фотобумагах, а также разной степенью пропускания ими ультрафиолетовых лучей. Наконец, отметим, что применение сканеров колоссально экономило время и средства.

27.3 КОНТРАТИПИРОВАНИЕ СЛАЙДОВ

Если качество оригинального слайда не вызывало нареканий, то целью контратипирования являлось получение слайд-копии максимальной точности (не считая некоторого возможного масштабирования). Дуплицирование выполнялось при помощи специальной контратипной (копировальной) пленки с гамма тонопередачи 1.0 либо при помощи обычной пленки с большей гамма, но при условии применения специальной гамма-редуцирующей маски (иногда, при необходимости, в связке с маской высоких светов — см. раздел 15.2 и 27.8).

Компенсация избыточной контрастности слайда выполнялась с помощью

гамма-редуцирующей маски, экспонировавшей в связке с оригиналом контратипную фотопленку (или обычную, но с бóльшим числом масок). Когда контрастность слайда оказывалась слишком низкой, уровень маскирования снижали либо вообще обходились без него, используя обычные пленки с высокой гамма тонопередачи.

Слишком светлые или слишком темные слайды корректировались за счет управления уровнем контратипирующей экспозиции. Коррекция хроматического баланса осуществлялась за счет цветокоррекционных фильтров фотоувеличителя, размещаемых чаще всего в ламповом отсеке аппарата (а не перед объективом), дабы избежать падения пространственного разрешения копии.

При контратипировании слайдов иногда возникали определенные потери колориметрической чистоты, а также искажения цветового тона и светлоты некоторых элементов изображений. Несмотря на то что коррекция этих недочетов была вполне осуществима и выполнялась путем маскирования или в процессе сепарирующего барабанного сканирования, желательным было то, чтобы сама по себе операция контратипирования давала минимальные тональные и хроматические отличия от оригинала.

Мы знаем, что в современных контратипных (и обычных) фотопленках межслойное взаимодействие сильно выражено, и это препятствует эффектам паразитных поглощений красителями. Еще бóльшую степень компенсации потерь по чистоте цвета элементов изображений дает сильный разнос по спектру (в сравнении с пленками обыкновенными) спектральных чувствительностей слоев некоторых контратипных пленок. Однако же обычные фотопленки давали сходные эффекты за счет высокой гамма тонопередачи. Таким образом, описанным путем удавалось полностью компенсировать недостатки, исходно присущие субтрактивному цветовоспроизведению, и порой получать контратипы максимально близкие к оригинальному изображению. Однако же мелкие отличия между оригиналом и его контратипом почти всегда оставались.

Практика контратипии слайдов описана в разделе 27.8.

27.4 КОНВЕРСИЯ ОТРАЖАЮЩИХ ФОТООТПЕЧАТКОВ В СЛАЙДЫ

Для получения слайд-копии отражающих отпечатков оптимальным являлось применение обычной цветной обращаемой фотопленки. Поскольку гамма тонопередачи оригинала в этом случае объявлялась равной единице, традиционная слайд-пленка давала контрастность копии, аналогичную той, что получилась бы при регистрации исходной сцены. Необходимость в тоно- и хромокоррекции в этом случае оказывалась минимальной, но при необходимости коррекция выполнялась за счет управления уровнем экспозиции и применения фильтров соответственно.

27.5 ПОЛУЧЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ОРИГИНАЛОВ НА БУМАГЕ

Несмотря на то что на отражающих отпечатках труднее добиться тех же визуальной резкости и качества тоно- и хромопередачи, что на слайдах, вторичные оригиналы часто изготавливались на отражающих носителях (бумагах), поскольку бумага проще в монтаже и монтаж этот больше походит на конечный оттиск. Последнее существенно облегчало экспертную визуальную оценку издания в целом. Наиболее подходящими для этих целей были цветная обращаемая фотобумага *Ektachrome* (см. раздел 13.3) либо *Cibachrome* (см. раздел 17.10).

Отличия в коэффициентах контрастности (гамма) между оригинальными слайда-

ми и оригинальными отражающими фотоотпечатками (см. раздел 6.5) вели к необходимости применения обращаемых фотобумаг разной контрастности, однако за счет направленного экспозиционного освещения при копировании эффективную гамма отражающих вторичных оригиналов повышали почти до уровня слайда, что радикально снижало эффекты паразитной экспозиционной подсветки.

27.6 РАБОТА С ЦВЕТНЫМИ НЕГАТИВАМИ

Когда оригиналом служил цветной негатив, применялись как минимум четыре способа получения сепараций:

1. Прямое изготовление.
2. Изготовление вторичного отражающего оригинала.
3. Изготовление вторичного отражающего оригинала с последующим изготовлением его слайд-копии (см. раздел 27.4).
4. Изготовление на специальной контратипной негативной пленке вторичного слайд-оригинала.

Понятно, что чем меньше было фотостадий, тем выше было качество и ниже общая стоимость работ. В этом ключе лучшим являлся первый метод, а худшим — третий. Однако первый метод не давал позитивного изображения, которое позволяло визуально оценить результат до изготовления сепараций. Правда, позитивное изображение можно было посмотреть на экране цветопробного монитора, но, разумеется, сие исключало возможность ретуши по позитиву.

Первый способ применялся в основном в газетной индустрии: черно-белые изображения воспроизводились путем прямого растрирования черно-белых отражающих оригиналов. Кстати говоря, этот же способ служил основой еще одного метода получения цветных сепараций: сначала изготавливались четыре черно-белых сепарированных отражающих отпечатка (а дальше по обычной схеме) (Austin, 1968). Метод позволял также при помощи специальной промежуточной фотопленки конвертировать оригинальные слайды в негативы с последующим изготовлением сепарированных черно-белых отпечатков.

27.7 ФАКСИМИЛЬНАЯ ПЕРЕДАЧА

Скоростная передача изображений с одного конца света в другой всегда была характерным атрибутом газетной индустрии. Долгое время поступали так: черно-белый отпечаток монтировался на стеклянном барабане, который затем раскручивался. По поверхности барабана, в направлении его оси, скользила световая точка, благодаря чему вся поверхность изображения сканировалась строчным образом. Сигналы, мощность которых была пропорциональна коэффициенту отражения в каждой точке отпечатка, передавались по телефонным проводам на специальную приемную станцию, которая, в свою очередь, воспроизводила изображение путем экспонирования фотобумаги, наклеенной на аналогичный барабан. Уровень экспозиции по каждой точке модулировался мощностью лампы, зависевшей от мощности принятого сигнала.

Скорость сканирования определялась шириной полосы пропускания телефонных линий (см. раздел 19.2), составлявшей, как правило, порядка 3 кГц. При такой полосе рабочая скорость развертки была равна одной строке в секунду, а частота строк обычно составляла от 100 до 135 линий на дюйм (от 40 до 54 линий на см).

Цветные фотографии передавались тем же путем, но предварительно изготавлива-

лись их трихроматические черно-белые сепарации: приемная станция воспроизводила их копии, которые затем служили оригиналами для сепараций печатных. Когда выполнялось маскирование (см. гл. 28), то сепарации старались воспроизводить не на бумаге, а на фотопленке.

Описанная система была хороша тем, что использовала давно отработанные и привычные методы. Однако в дальнейшем, имевшееся оборудование усовершенствовали: когда оригиналом служил цветной слайд или отпечаток, он сканировался трижды — вначале красным лучом, затем зеленым, затем синим; аналогично приемный аппарат вместо трех черно-белых сепараций воспроизводил цветное изображение за счет последовательной развертки красного, зеленого и синего лучей, экспонирующих цветную листовую фотопленку или фотобумагу.

Время передачи одного цветного изображения занимало порядка 1 часа, либо даже около 1 час 20 мин (если передавались черно-белые сепарации). При скорости развертки 1 лин./с сие давало порядка 1200 строк (то есть изображение 25 см высотой при 120 строках на дюйм или 48 строках на см). Несколько сократить время удавалось путем расширения полосы.

Для передачи сигналов, включавших в себя данные о масках (см. гл. 28), а также GCR-данные (см. раздел 29.14), требовалась одновременная передача трихроматических сигналов, чего добивались за счет сканирования оригинала (обычно слайда) белым светом с последующим делением этого света дихроичными зеркалами на длинноволновую (красную), средневолновую (зеленую) и коротковолновую (синюю) составляющие, то есть так же, как в системах бегущего луча (см. раздел 23.9). В одном из применявшихся ранее аппаратов в качестве экспонирующего узла применялась специальная электронно-лучевая трубка (Smith, 1973).

Повсеместное распространение цветных факсимильных аппаратов (цветных факсов) привело даже к появлению ряда цветовых стандартов.

Наконец, отметим, что в целях минимизации объема передаваемой информации, исходя из особенностей зрительной системы человека, стали передаваться сигналы, несущие CIELAB-значения (Mutz и Ли, 1994).

27.8 ПРАКТИКА КОНТРАТИПИРОВАНИЯ СЛАЙДОВ

Напомним, что, перед тем как изготовить сепарации, с оригинального слайда выполнялся вторичный оригинал (см. раздел 27.2). В данном разделе мы рассмотрим практические приемы его получения.

Как было показано в гл. 6, слайды априори ориентированы либо на проекционный показ в темном окружении (и в этом случае их гамма тонопередачи должна быть равной 1.5), либо на показ в тусклом окружении (и тогда гамма тонопередачи должна быть равной 1.25). Обычные цветные обращаемые фотопленки балансированы так, что выдают необходимую гамма в результате регистрации реальных сцен, поэтому при изготовлении дублей гамма последних оказывается чрезмерно высокой. Настоящая контратипная пленка, очевидно, должна давать гамма 1.0, такие пленки (например, *Kodak Ektachrome Duplicating Film*) широко распространены даже сегодня, однако же в связке обычной цветной обращаемой фотопленки с маской понижения контрастности система обретала особую гибкость. Один из возможных путей работы такой системы послужит нам в качестве примера (Bethell,1968).

Последовательность операций была следующей:

1. С оригинала выполнялась маска высоких светов.

2. Маска монтировалась на оригинал, и через полученную связку контактно экспонировалась другая маскирующая пленка, с которой получалась гамма-редуцирующая маска.

3. Маска высоких светов удалялась, а на оригинале с точной приводкой монтировалась гамма-редуцирующая маска, полученная на предыдущем этапе.

4. Пленка, используемая в качестве контратипной, укладывалась на столик фотоувеличителя и экспонировалась через связку, полученную на этапе 3. Для получения требуемого хроматического баланса применялись цветокоррекционные фильтры, расположенные в ламповом отсеке увеличителя.

5. Экспонированная контратипная пленка подвергалась равномерной импульсной подсветке через специальный окрашенный фильтр.

6. На предпоследнем этапе пленка обрабатывалась.

7. В финале вторичный оригинал ретушировался (ежели в том была необходимость).

Смысл маски высоких светов состоял в том, чтобы не дать гамма-редуцирующей маске снизить контрастность высоких светов на вторичном оригинале, ведь высокие цвета обычно фиксируются на подошве характеристической кривой слайд-пленки и уже сами по себе имеют низкую гамма.

Маску высоких светов можно применять и с целью повышения их контрастности на вторичном оригинале. Так, к примеру, если гамма тонопередачи пленки, использованной для маскирования высоких светов, была больше 1.0, оригинальный слайд в связке с маской высоких светов воспроизводил последние как негативное изображение (а не позитивное). Затем негативное изображение копировалось в позитив на гамма-редуцирующую маску, и эта связка (оригинальный слайд плюс маска) воспроизводила света с большей гамма, чем на оригинальном слайде. Отметим, что усиление гамма высоких светов на вторичном оригинале проходило удачно, если высокие света оригинала «не ложились» на низкоконтрастный участок подошвы контратипной пленки. Усиление гамма высоких светов описанным путем порой служило повышению качества финального полиграфического оттиска.

Неплохой результат по маске высоких светов давало также экспонирование маскирующей пленки через средне-оранжевый фильтр (к примеру Wratten 85B): в результате его применения получалась бóльшая степень маскирования красных элементов изображения и меньшая — синих, что помогало уйти от паразитного избытка голубой краски при воспроизведении оттиском светло-теплых элементов изображения, в частности таких, как кожа человека.

На недоэкспонированных (как говорят, «плотных») слайдах высокие света сцен фиксируются на бóльших оптических плотностях, чем те, что приходятся на низкоконтрастный участок подошвы обычных фотопленок, и, следовательно, требуют меньшего маскирования или даже полного его отсутствия. Однако же на переэкспонированных («блеклых») слайдах почти все высокие света ложатся на подошву характеристической кривой и, следовательно, требуют усиленного маскирования.

Эффективного маскирования недо- и переэкспонированных слайдов добивались следующим образом: маскирующая пленка в обоих случаях экспонировалась на неко-

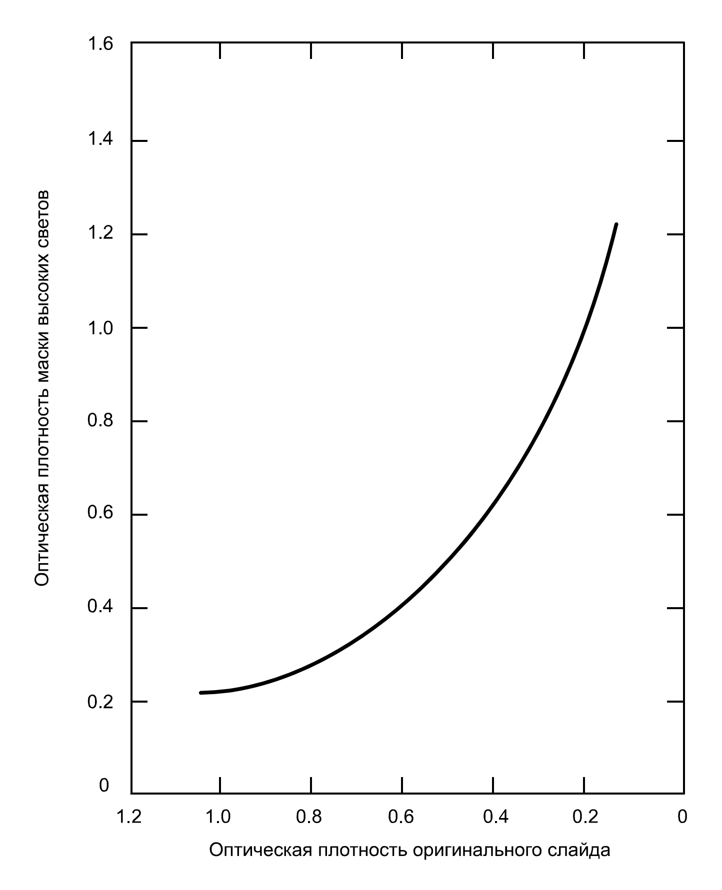


Рис. 27.1 Взаимоотношения между оптическими плотностями элементов оригинального слайда и оптическими плотностями типичной маски высоких светов, использовавшейся в контратипировании слайдов.

ем неизменном уровне, то есть независимо от интегральной оптической плотности оригинального слайда. Поэтому плотные слайды почти не оставляли следа на маске высоких светов, в то время как переэкспонированные вписывали в нее очень большое количество оптической информации — что, собственно говоря, и требовалось. Нужный характер взаимоотношений между оптическими плотностями светов оригинального слайда и оптическими плотностями маски высоких светов показан на рис. 27.1; при этом мы видим, что некоторые слайды почти не нуждаются в маскировании.

Требуемая гамма тонопередачи маски понижения контрастности (гамма-редуцирующей маски) определялась рядом факторов, в частности коэффициентом контрастности контратипной пленки, а также требуемой величиной снижения гамма данного конкретного оригинала. Наиболее удобным путем достижения сего являлось получение серии характеристических кривых за счет разного времени проявки маскирующего фотоматериала (см. рис. 27.2). Для каждого типа контратипной фотопленки или для каждой партии этих пленок одна из кривых оказывалась оптимальной (к примеру, жирная линия на рис. 27.2), и все последующие маски обрабатывались именно в этом режиме.

Характер снижения контрастности, необходимый для разных слайд-оригиналов, был в целом функцией от уровня их экспозиции: недоэкспонированные оригиналы требовали большего снижения гамма в светах, переэкспонированные — в тенях. И первое, и второе вновь достигалось при фиксированном уровне экспозиции маскирующей фотопленки и вне зависимости от интегральной оптической плотности ориги-

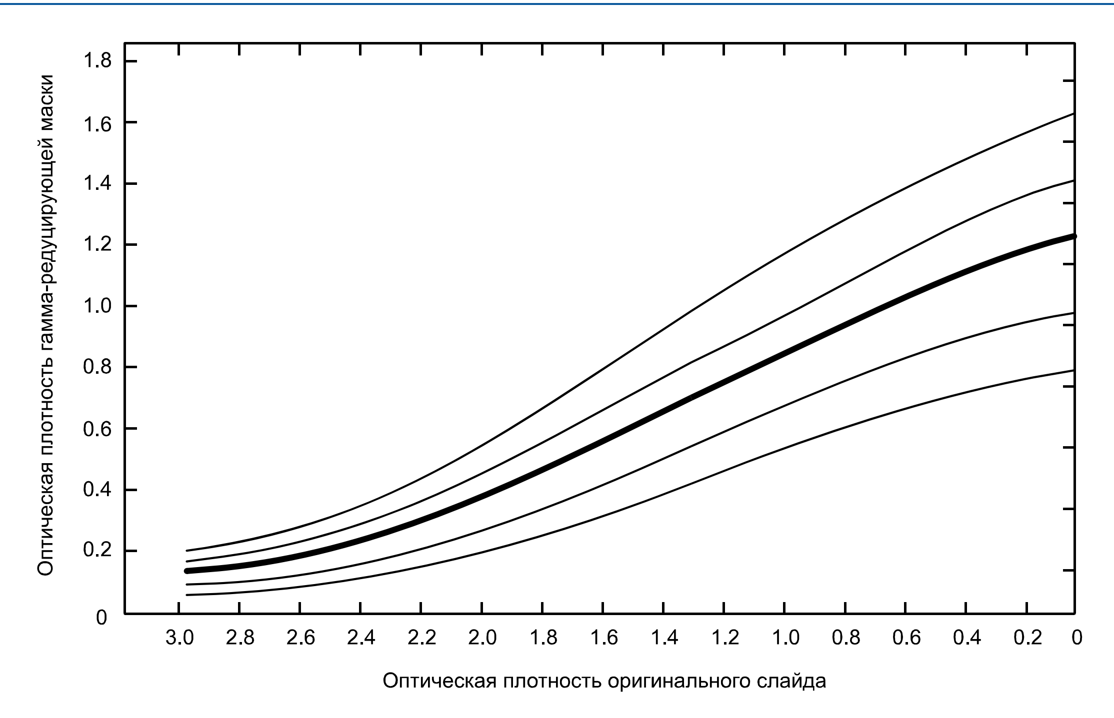


Рис. 27.2 Взаимоотношения между оптическими плотностями элементов оригинального слайда и оптическими плотностями типичной гамма-редуцирующей маски, использовавшейся в контратипировании слайдов. Кривые соответствуют разным продолжительностям проявки маскирующей фотопленки. Одна из кривых (жирная линия) обычно выбирается в качестве стандартной для данной партии маскирующего фотоматериала.

нала. Так, к примеру, когда уровень экспозиции был выбран таким, что оптические плотности оригинала, превышающие 2.0, ложились на подошву характеристической кривой маскирующей пленки (рис. 27.2), то маска давала меньшую степень редукции гамма в тенях изображений (что было желательным, поскольку эти области изображений склонны терять контрастность из-за того, что легли на плечо характеристической кривой оригинального фотоматериала). С другой стороны, тени переэкспонированных слайдов не попадали на подошву характеристической кривой маскирующей пленки и, следовательно, в полной мере требовали редукции контрастности.

Если гамма-редуцирующая маска изготавливалась через оранжевый фильтр (скажем, Wratten 85B), то длинноволновые (визуально «теплые») элементы изображения экспонировали маскирующий материал сильнее, чем коротковолновые (визуально «холодные»), и поэтому на вторичном оригинале воспроизводились относительно более темными.

Описанная схема действий являлась весьма эффективным механизмом профилактики паразитного избытка голубой краски, снижающего тоновые и хроматические модуляции в красных элементах изображений (что лишало эти элементы их визуального объема). Если значимые элементы были преимущественно синими или зелеными, а важных красных элементов при этом в изображении не было, то гамма-редуцирующая маска экспонировалась обычным белым светом.

Гамма-редуцирующая маска изготавливалась, как правило, слегка нерезкой, благодаря чему не снижала контрастность в мелких деталях изображений, тем самым повышая визуальную резкость копии (см. раздел 15.3).

На следующем технологическом этапе гамма-редуцирующая маска с точной приводкой монтировалась на оригинальный слайд (маска высоких светов перед этим уда-

лялась) и вся конструкция проекционным путем экспонировала контратипный фотоматериал.

Затем с целью смягчения теней выполнялась постэкспозиционная импульсная подсветка экспонированной контратипной пленки: сие не лучшим образом сказывалось на восприятии вторичного оригинала как самостоятельного изображения, но при этом существенно упрощало самою печать. Отметим также, что, используя при подсветке цветокоррекционные фильтры, удавалось компенсировать тенденцию теней к обретению паразитного хроматического сдвига.

Оригинальные слайды разных типов (или выполненные на пленках разных производителей) требовали разного подхода к получению стандартизированных дублей, что представляло реальную проблему, поскольку визуально было очень трудно определить, на каком типе фотоматериала выполнен оригинал. Одним из источников сложностей являлось то, что голубой краситель в разных фотопленках имел разные коэффициенты поглощения в дальнем длинноволновом участке видимого спектра, где зрительная система весьма низкочувствительна, но где чувствительность фотоматериалов достаточно велика (рис. 4.3). Если свет дальнего красного конца спектра «подрезать» специальным фильтром (например, дихроичным, позволяющим четко выделить из спектра нужную полосу), проблему удавалось несколько ослабить. Отметим, что денситометрические измерения фотопленок, выполнявшиеся через красные фильтры с разными коэффициентами пропускания в дальнем длинноволновом конце, помогали в идентификации фотопленок с разными типами cyan-красителя (Graebe, 1976).

27.9 СРАВНЕНИЕ СЛАЙД-ОРИГИНАЛОВ С ИХ СЛАЙД-КОПИЯМИ

Контратипы слайдов, разумеется, требовали проверки. Когда оригинальный слайд и его дубль строились на одних и тех же красителях, а целью контратипирования являлось получение копии, максимально приближенной к оригиналу, выполняли одновременное визуальное сравнение оригинального слайда и его копии, расположив их край в край при равномерной белой подсветке любым подходящим источником.

Если копия была отлична от оригинала, но при этом по интегральной оптической плотности, хроматическому балансу и гамма приведена к некоему стандарту, то источник подсветки должен был выбираться с особым пристрастием.

Когда оригинал и копия строились на разных красителях, выбор спектрального состава подсветки был весьма труден, поскольку слайды, которые выглядели одинаковыми при одном источнике, оказывались совершенно разными при другом.

27.9.1 Стандартные условия просмотра

Сегодня в контексте сравнения слайд-оригиналов с их слайд-копиями действует общее правило, сформулированное, в частности, в стандарте ISO 3664:2000: в полиграфии и фотографии источник света, используемый для визуальной оценки качества оригиналов и копий, должен иметь ту же цветность, что и Стандартный осветитель D_{50} (см. раздел 8.2), коррелированная цветовая температура которого, напомним, равна 5000 К (200 майред). Источнику дозволяется отклоняться от этого значения только в рамках ± 5 майред и в той же степени по другим направлениям на $u'v'$-диаграмме (American National Standards Institute, pH 2.32, 1972; International Standards Organization, 3664:2000; Johnson и Scott-Taggart, 1993).

Необходимо также определить спектральное распределение энергии просмотрового освещения, что проще всего сделать, приняв спектральное распределение Стандартного осветителя D_{50} (дано в таблице спектральных распределений в Приложении 2). Допуск на девиацию спектров просмотровых источников (см. раздел 10.12), позиционируемый т.н. *CIE общим индексом цветопередачи* (CIE, 1973), лежит между значениями 90 и 100, а т.н. *Специальные индексы цветопередачи* для восьми манселловских образцов должны иметь значение выше 80. Допуски можно также определить и в т.н. спектрально-полосной системе как ± 15% мощности по каждой полосе и ± 7% в смежных парах полос (при 30% по каждой ультрафиолетовой полосе) (Crawford, 1963a и b; British Standard 950, Part II, 1967).

27.10 СРАВНЕНИЕ ОТРАЖАЮЩИХ ОТПЕЧАТКОВ СО СЛАЙДАМИ

При экспертном сравнении отражающих оригиналов с их слайд-копиями к правильной организации просмотровых условий обычно относились со всей ответственностью. Необходимость в таком сравнении возникала тогда, когда оригинал являл собой слайд, а репродукция — оттиск на отражение. Однако выполнять такое же сравнение приходилось и тогда, когда оригиналом был оттиск на отражение или живописное полотно, а репродукция, разумеется, — тоже оттиск на отражение, но при этом слайд выступал в роли промежуточной технологической инстанции в производстве сепараций.

27.10.1 Стандартные условия просмотра

Метод сравнения отражающих отпечатков со слайдами опирался (и опирается) на уже упомянутый документ ISO 3664:2000 и в целом выглядит следующим образом:

— коррелированная цветовая температура и спектральное распределение энергии источника освещения отражающих отпечатков должны быть точно такими же, как у источника просмотровой подсветки слайдов;

— коррелированная цветовая температура обоих источников должна быть равной 5000 К, а допуски на цветность и спектральное распределение энергии должны быть теми же, что указаны в разделе 27.9;

— слайды должны иметь заднюю подсветку рассеянным светом, и свет этот должен выходить за края слайда как минимум на 51 мм и как минимум по трем его сторонам (но при этом площадь светового пятна не должна превышать четырехкратный размер слайда); либо же, альтернативно, слайд должен быть окружен непрозрачным белым листом с освещенностью, равной освещенности отражающего отпечатка;

— фотометрическая яркость поверхности просмотрового стола на просвет должна составлять 1270 ± 320 кд/м^2;

— уровень освещенности рабочей поверхности просмотрового стола на отражение должен быть равен 2000 ± 500 лк (ISO 3664:2000).

Однако поскольку подготовка изображений к печати в расчете на столь высокую просмотровую освещенность ведет к тому, что финальные отпечатки в домашних условиях (50—100 лк) выглядят весьма темными, рекомендуется заменить эти цифры на 635 кд/м^2 для слайдов и 1000 лк для отражающих отпечатков.

Описанные просмотровые условия позиционированы исходя из того, что слайды и отражающие отпечатки станут восприниматься зрением практически одинаково: используя одно и то же спектральное распределение энергии, добиваются одинаковой

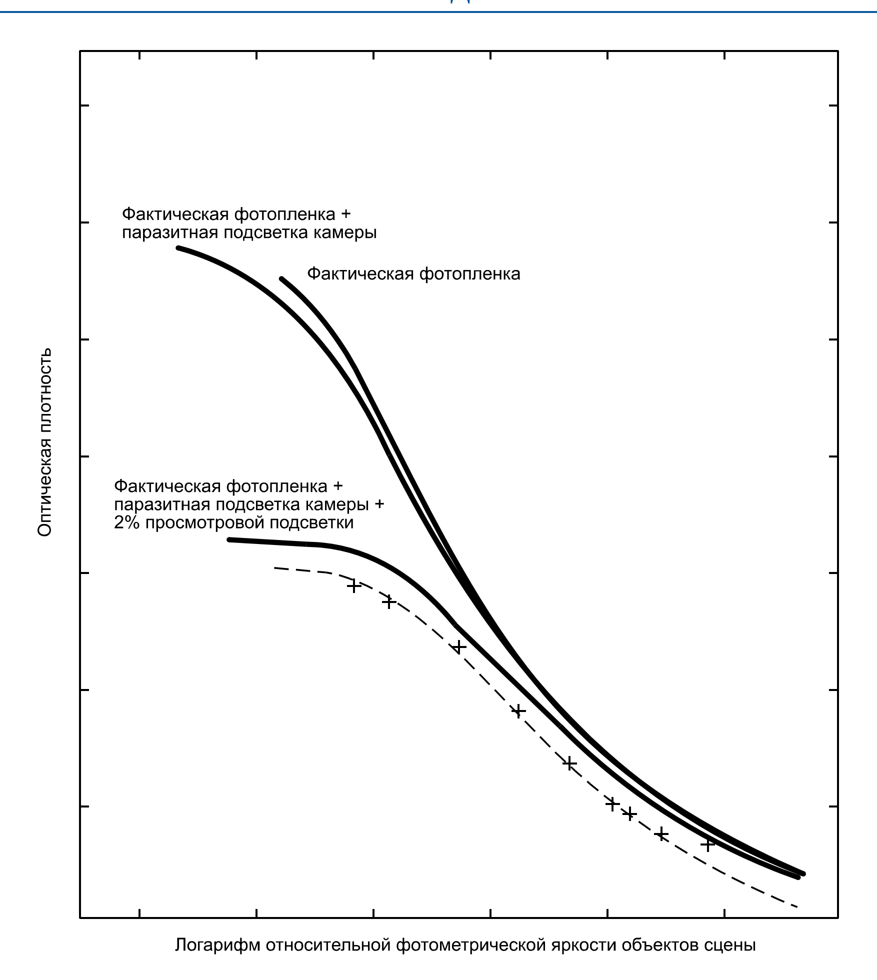


Рис. 27.3 Модификация характеристической кривой листовой фотопленки («Фактическая фотопленка») путем добавки паразитной подсветки фотокамеры (0.4% фотометрической яркости белой точки сцены) и существенно большей просмотровой подсветки (2% фотометрической яркости белой точки изображения), понижающая гамма системы до 1.0. Пунктирная линия позволяет отследить легкий рост фотометрической яркости всех элементов изображения. Крестики, взятые с рис. 6.8, демонстрируют оптические плотности элементов отражающего отпечатка в бытовых условиях просмотра. Тесное соседство крестиков с пунктирной линией указывает на то, что в специально подготовленных просмотровых условиях слайд может обладать очень высоким визуальным сходством с изображением, выполненном на отражающем носителе.

цветопередачи, а используя предписанные уровни освещенности поверхностей и фотометрической яркости задней подсветки слайдов — того, что незапечатанные участки отражающих отпечатков (белая точка отпечатков) будут визуально уравнены с белой точкой слайдов (0.3).

Отметим, что светящееся обрамление слайда дает подсветку, снижающую эффективную гамма слайда с 1.25 (у листовых слайдов) до 1.0, что необходимо для визуального уравнивания контрастности с отражающим отпечатком. Такое снижение лишь приблизительно, но если условия просмотра построены более тщательно и организована равномерная подсветка, соответствующая 2% фотометрической яркости используемого источника, то, как мы видим из рис. 27.3, тональный баланс слайда оказывается очень близким к тональному балансу отпечатка (Hunt, 1968). Однако описанный подход несколько непрактичен.

Предложенный метод сравнения слайдов с отражающими отпечатками очень ши-

роко применяется по сей день и дает в руки полиграфистов устойчивый и надежный механизм работы с цветными изображениями, позволяющий добиваться результатов высокого качества при сравнительно низкой стоимости оттисков. Он позволяет также потребителям печатной продукции, рекламодателям и печатникам руководствоваться в оценке печатной продукции единым общим принципом, а цветокорректорам и ретушерам добиваться требуемого результата (Harris, 1973).

На этапе приладки тиража (и в процессе печати) печатник должен визуально сравнивать полученный оттиск с оттиском цветопробным (см. следующий раздел), располагая первый и второй край в край. Для такого сравнения предпочтителен источник с коррелированной цветовой температурой, превышающей 5000 К, поскольку в этом случае лучше видны любые отклонения по желтому красочному изображению. То есть здесь можно рекомендовать источник с цветностью Стандартного D_{65}-осветителя, коррелированная цветовая температура которого равна 6500 К (British Standard 950, Часть I, 1967), и, если химический состав красителей на тиражном оттиске идентичен таковому на оттиске цветопробном, отклонение от спектра D_{50} не приведет к распаду метамерного равенства между этими оттисками.

27.11 ДОПЕЧАТНАЯ ЦВЕТОПРОБА

Когда растровые сепарации были готовы, прежде чем приступить к печати тиража, а следовательно, к трате немалых средств, с этих сепараций выполнялась т.н. *цветопроба* (*proof*), представлявшая единичный экземпляр полной цветовой репродукции оригинала. Визуальное восприятие цветопробы в идеале должно быть идентично восприятию тиражного оттиска, и, следовательно, это ситуация, где должен был реализовываться т.н. *принцип визивиг* (WYSIWYG — What You See Is What You Get) — «что видишь, то и получаешь». Добивались сего с помощью разных цветопробных систем, которые можно разделить на три основных класса:

— системы, работавшие по принципу *надпечатки* (*сюрпринт, surprint*);

— системы, работавшие по принципу *наложения* (*оверлей*, *overlay*);

— *электронные* цветопробные системы.

(Сразу отметим, что *цифровая цветопроба* будет обсуждаться нами в разделе 33.5.)

27.11.1 Сюрпринт

В цветопробе данного класса каждая сепарация контактно экспонировалась на лист из специального материала. Отметим, что использовалась именно контактная печать, поскольку только исключив оптические узлы добивались идеальной проработки растровых точек по всей площади цветопробного листа. Понятно, что при этом изображения не масштабировались.

Цветопробные материалы формировали голубое, пурпурное, желтое и черное растровые изображения, которые последовательно, с точной приводкой и, как говорят, в оптическом контакте (то есть без какого-либо воздушного зазора между изображениями) переносились на специальную основу. Существовало как минимум три основных системы сюрпринтной цветопробы, принцип действия которых продемонстрирует рис. 27.4.

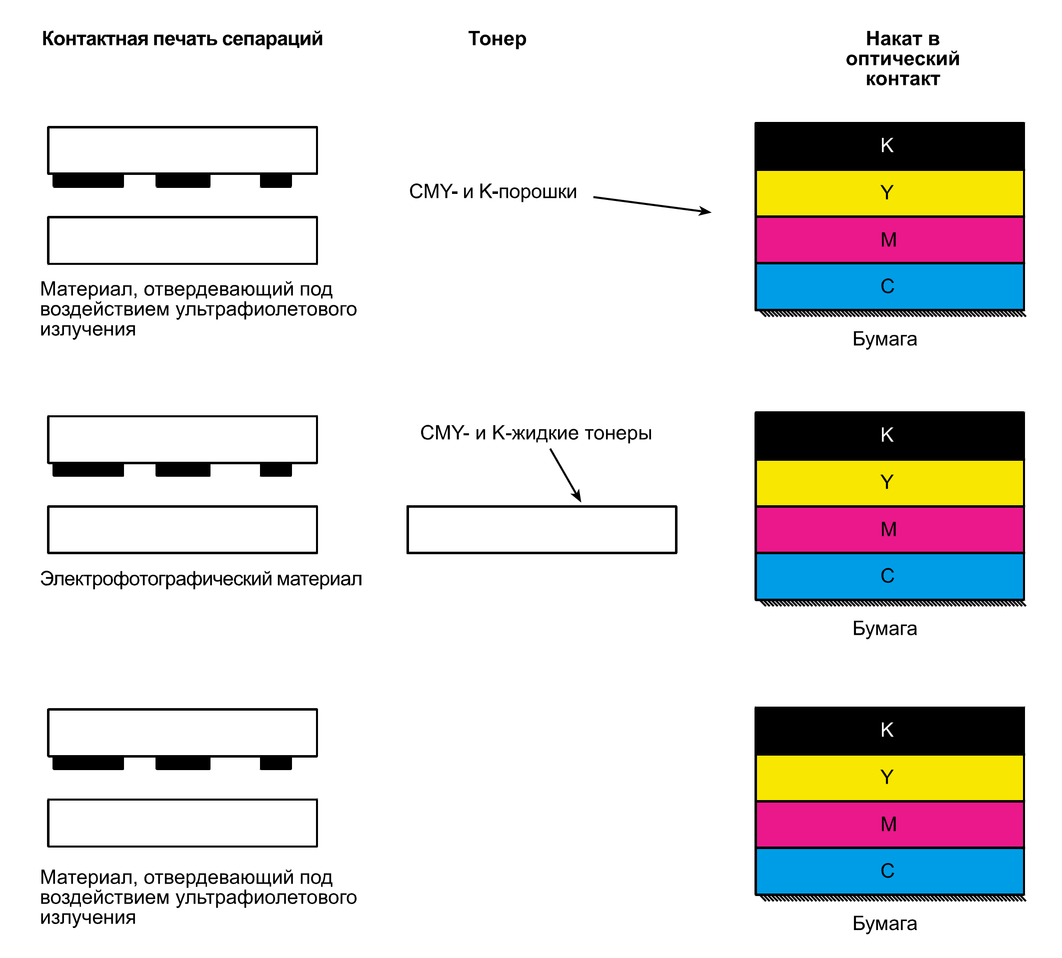


Рис. 27.4 Три способа получения сюрпринтной цветопробы.

27.11.1.1 Первый технологический вариант

В верхней трети рис. 27.4 показана система, в которой на специальную пленку, отвердевающую под действием ультрафиолетового излучения, контактно экспонировались печатные сепарации (а красочные изображения переносились затем на специальную основу). На неэкспонированных участках поверхность пленки оставалась клейкой (то есть не отвердевшей под воздействием ультрафиолета) и схватывалась с основой, благодаря чему принимала и удерживала окрашенный порошковый тонер, спектральные характеристики которого соответствовали печатной краске по данной сепарации. Экспозиция, перенос и адгезия порошка повторялись по каждой из четырех сепараций с использованием соответствующего тонера. Избыток тонера стряхивали в кювету, откуда его забирала специальная всасывающая трубка. Финальной операцией была завершающая послойная сборка изображения.

Примером сюрпринтной цветопробной системы на твердых тонерах, являлся знаменитый *Chromalin* компании DuPont.

27.11.1.2 Второй технологический вариант

В средней трети рис. 27.4 показана система, в которой печатные сепарации контактно экспонировались на специальный электрофотографический материал. Затем

этот материал покрывался жидким тонером, спектральные характеристики которого соответствовали печатной краске по данной сепарации, после чего накатывался на основу (бумагу). Экспонирование, трансфер тонера и накат выполнялись по каждой сепарации.

Примером сюрпринта на жидких тонерах являлась система *Kodak Signature*.

27.11.1.3 Третий технологический вариант

В нижней части рис. 27.4 показана система, построенная на применении специального материала, отвердевающего под воздействием ультрафиолетового излучения и содержащего голубой, пурпурный, желтый и черный пигменты. Сепарации контактно экспонировались ультрафиолетом, экспонированные участки отвердевали, а лишний (не отвердевший) пигмент удалялся с помощью специального растворителя. В результате образовывались требуемые красочные изображения.

На следующем технологическом этапе голубая, пурпурная, желтая и черная пигментные сепарации с точной приводкой послойно наклеивались на основу. Отсутствие операции переноса тонера существенно упрощало работу оператора, однако понятно, что в этом случае те или иные печатные колоранты имитировались *разными цветопробными материалами*, а не разными тонерами, поэтому для имитации разных наборов полиграфических красок существовали разные цветопробные комплекты.

Примерами систем данного типа являлись *3M Matchprint*, *Kodak Contract* и *Fuji ColorArt*.

* * *

Стоит сказать, что базовой проблемой всех описанных систем являлась проблема согласования размера растровых точек на цветопробе с их размером на печатном оттиске. Однако при помощи ряда приемов оптическое растискивание, свойственное цветопробным системам, все же удавалось уравнять с величиной растискивания красочного, т.е. — тиражного (см. раздел 33.3).

Наконец, отметим, что все описанные системы великолепно аппроксимировали тональный и хроматический балансы полиграфических отпечатков.

27.11.2 Оверлей

В системах оверлейного типа голубое, пурпурное, желтое и черное красочное изображения получались путем контактного экспонирования печатных сепараций на специальный цветопробный материал (сходный по своему строению с описанными выше сюрпринтными материалами), после чего наклеивались на основу, но — не в оптический контакт (т.е. между пленками оставались воздушные прослойки). Отсутствие оптического контакта вело к росту минимальной оптической плотности результирующего изображения за счет межслойных переотражений, из-за чего цветопроба, изготовленная таким способом, являлась лишь приблизительной визуальной аппроксимацией печатного оттиска. Вместе с тем такая проба служила неплохим инструментом контроля взаиморасположения элементов на спусковом макете, а главным преимуществом оверлейной системы являлось то, что она позволяла оценить качество каждого красочного изображения в отдельности.

Примерами оверлейных цветопробных систем являлись *3M Colorkey*, *3M Mathkey* и *Kodak Accord*.

27.11.3 Электронные цветопробные системы

Когда сепарации изготавливались с помощью сканеров (см. гл. 29), рабочие изображения представляли собой набор электронных сигналов, которые, в том числе, употреблялись для воспроизведения этих изображений на экранах мониторов. Такие изображения иногда использовались в качестве цветопробных, представляя собой т.н. «мягкую» цветопробу (*софтпруф, soft proof*). Очевидное преимущество «мягкой» цветопробы — в возможности манипулировать изображением с целью коррекции его тонового и хроматического балансов. Компьютерная программа при этом транслировала все внесенные изменения в печатные сепарации. Еще одним преимуществом софтпруфа являлось то, что информация могла передаваться в отдаленные регионы, что позволяло легко оценить подготовленное изображение в других организациях и даже в других странах. Однако визуальное уравнивание изображения на экране самосветящегося дисплея с отражающим печатным оттиском — весьма непростая задача, и поэтому в дополнение к софтпруфу электронные цветопробные системы предлагают такую опцию, как *«твердая» цветопроба* (*хардпруф, hard proof*), то есть проба, выполненная на отражающем носителе (бумаге). Метод производства такой цветопробы аналогичен тому, что используется в *настольных издательских системах* (см. гл. 33).

Несмотря на то что электронная цветопроба весьма удобна, она, как правило, не в состоянии обеспечить должный визивиг:

— во-первых, разрешение экранных изображений обычно много меньше, чем разрешение отражающих отпечатков;

— во-вторых, часто имеет место разница в хроматических балансах — белая точка мониторов в большинстве случаев настраивается на цветность D_{65}-осветителя (и даже выше), в то время как отражающий оттиск обычно рассматривают при освещении с цветностью, близкой к цветности D_{50} и даже ниже;

— в-третьих, охват цветностей стимулов, воспроизводимых монитором, ограничен треугольником цветностей, образованным позициями кардинальных стимулов этого монитора, в то время как охват стимулов, воспроизводимых отпечатанными изображениями (в связке с тем или иным освещением), определяется свойствами голубого, пурпурного, желтого и черного колорантов;

— в-четвертых, стимулы, воспроизводимые монитором, представляют собой подлинно аддитивную смесь красного, зеленого и синего кардинальных стимулов, тогда как стимулы, воспроизводимые отпечатком, образованы светом, отраженным от голубых, пурпурных, желтых и черных полутоновых точек;

— в-пятых, фотометрическая яркость окружения при просмотре экранных изображений чаще всего не соотносима со средней фотометрической яркостью изображения (что типично для отражающих отпечатков);

— в-шестых, максимальная фотометрическая яркость белой точки мониторов обычно не превышает 200 кд/м^2 (см. раздел 21.15), тогда как освещенность отпечатка порой давет фотометрическую яркость отраженного света существенно превышающую это значение;

— в-седьмых, динамический диапазон экранных изображений сам по себе достаточно ограничен, но еще больше сокращается под действием паразитной подсветки, в то время как динамический диапазон отражающего отпечатка ограничивается максимальной оптической плотностью полной смеси колорантов, степенью глянца поверхности, геометриями освещения и просмотра.

Итак, мы видим, что весьма маловероятно, чтобы динамические диапазоны экранного изображения и отражающего отпечатка оказались близкими друг к другу.

27.11.4 Цветопроба в глубокой печати

Сюрпринтные и оверлейные системы вполне подходят для имитации результатов высокой и литографской (офсетной) печати, но не глубокой, поскольку в глубокой печати количество краски, переносимой на поверхность, определяется не относительным размером растровых точек, а толщиной красочного слоя. Однако были найдены пути конверсии контонных сепараций глубокой печати в обычные полутоновые сепарации сюрпринта или оверлея. Альтернативно: сепарации непрерывного тона последовательно копировали на цветную фотобумагу через красный, зеленый и синий фильтры. Последний способ очень прост, но обычно давал лишь приблизительное представление о результатах печати, поскольку колориметрические показатели фотографических красителей радикально отличны от колориметрических показателей полиграфических красок.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

American National Standards Institute, pH2.32, Viewing conditions for the appraisal of color quality and color uniformity in the graphic arts industry (1972).

Austin, M., Conference Proceedings 1968, p.31, Institute of Printing, London (1968).

Bethell, P., Conference Proceedings 1968, p.19, Institute of Printing, London (1968).

British Standard 950: 1967, Artificial daylight for the assessment of colour, Parts I and II (1967).

C.I.E., Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, CIE Publication No. 13 (1965 and 1973).

Crawford, B.H., Brit. J. Appl. Phys., 14, 319 (1963a).

Crawford, B.H., Trans. Illum. Eng. Soc. (London), 28, 50 (1963b).

Graebe, C.M., Professional Printer, 20, 2 (1976).

Harris, I., Printing Technology, 17, 17 (July, 1973).

Hunt, R.W.G., Conference Proceedings 1968, p.5, Institute of Printing, London (1968).

International Standards Organization, ISO 3664, Photography, illumination conditions for viewing colour transparencies and their reproductions (1975).

Johnson, A.J., and Scott-Taggart, M., Guidelines for Choosing the Correct Viewing Conditions for Colour Publishing. PIRA, Leatherhead (1993).

Mutz, A.H., and Lee, D.T., IS&T and SID’s 2nd Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, page 52, IS&T, Springfield, Va, U.S.A. (1994).

Smith, J.H., Wireless World, 79, 215 (1973).

28 МАСКИРОВАНИЕ

28.1 ВВЕДЕНИЕ

В полиграфии от века стремились к работе по определенным стандартизированным схемам, сводящим к минимуму необходимость каких-либо нештатных манипуляций. В текущей главе мы подробно рассмотрим принципы и алгоритмы маскирования, которые со временем были положены в основу допечатной коррекции изображений при барабанном сканировании (см. гл. 29).

Первой попыткой создания системы технологичного и эффективного маскирования явилась разработка схем Gresham-McCorquodale (Gresham, 1952a, 1952b и 1956) и Kodak Short-Run (Clark, 1952; Staehle, 1952; Yule, 1953), однако же мы разберем чуть более поздние решения.

Все описываемые нами системы априори предполагали, что в роли «оригинала» выступал слайд (который чаще всего являлся контратипом оригинального изображения), выполненный на цветной обращаемой фотопленке. Однако, разумеется, все сказанное ниже вполне применимо и к отражающим оригиналам.

Целью маскирования чаще всего являлось получение набора полностью откорректированных негативных (или позитивных) печатных *сепараций*, с которых можно было изготавливать сепарированные печатные формы, а затем выполнять печать в стандартном режиме и без каких-либо дополнительных индивидуальных поправок.

Откорректированные сепарации были либо *контонными*, то есть безрастровыми (в этом случае растрирование выполнялось при изготовлении форм), либо *полутоновыми* — растрированными, то есть состоящими из точек.

Напомним, что базовые принципы маскирования обсуждались нами в гл. 15, а рис. 26.7 послужит одним из примеров реализации этих принципов.

28.2 ДВУХМАСКОВЫЕ СИСТЕМЫ

В те времена, когда маскирование выполнялось вручную, а сами приемы были по большей части эмпирическими, старались по возможности упростить его алгоритм. Одна из методик (рис. 28.1) задействовала только две маски: одну — изготавливаемую с применением зеленого фильтра и используемую для изготовления yellow-сепарации, и вторую — изготавливаемую с применением magenta-фильтра и используемую для изготовления magenta- и cyan-сепараций.

28.2.1 Компенсация паразитного коротковолнового поглощения

Маска, выполнявшаяся за зеленым фильтром и применявшаяся для изготовления yellow-сепарации, давала коррекцию паразитного поглощения magenta-красителем в коротковолновой («синей») части спектра. Но ежели красители были таковы, что отношение оптической плотности за зеленым фильтром к оптической плотности за синим у cyan-краски и у magenta было одним и тем же (краски, имеющие равные отношения оптических плотностей за зеленым и за синим фильтрами часто именуют *тон-балансными* красками, то есть сбалансированными по цветовому тону), то данная

Экспозиция маскирующей пленки:	Маска использовалась при изготовлении:	Гамма маски	Маска корректировала:
за зеленым фильтром (зеленым светом)	yellow-сепарации	0.5	паразитное коротковолновое («синее») поглощение magenta- и cyan-красками
за magenta-фильтром (красным и синим светом)	magenta-сепарации	0.5	паразитное средневолновое («зеленое») поглощение cyan-и yellow-красками
	cyan-сепарации	0.5	коэффициент контрастности (гамма) cyan-красочного изображения

Рис. 28.1 Упрощенная процедура маскирования, в которой маски изготавливались за зеленым и magenta-фильтрами.

маска автоматически компенсировала паразитное коротковолновое поглощение cyan- и magenta-красочными изображениями (Hartsuch, 1958; Yule, 1967 стр. 53). Поскольку оптическая плотность всех cyan- и magenta-красителей за зеленым фильтром выше, чем за синим, масочная коррекция паразитных поглощений magenta-краской в целом оказывалась адекватной и краске cyan.

Отметим, что, в отличие от обычных масок, маска, выполненная за зеленым фильтром, позволяла уйти от необходимости снижения количества magenta-краски в тех участках изображения, где присутствовал cyan. То есть на этих участках маскирование оказывалось бо́льшим, чем того требовала коррекция паразитных поглощений одной лишь magenta-краской, и сей избыток позволял компенсировать паразитное коротковолновое поглощение cyan-краской (Pollak, 1956).

28.2.2 Компенсация паразитного средневолнового поглощения

Маска, выполнявшаяся через magenta-фильтр и использовавшаяся при изготовлении сепарации за зеленым фильтром (magenta-сепарации), давала коррекцию паразитного средневолнового («зеленого») поглощения cyan- и yellow-красками. Паразитное средневолновое поглощение cyan-краской обычно много больше, чем у yellow, поэтому все, что требовалось, — это чтобы длинноволновый («красный») компонент, пропущенный magenta-фильтром, давал маску большей контрастности, чем была бы за синим фильтром. Разумеется, одна маска не могла обладать двумя разными гамма, но если magenta-фильтр был подобран так, что коротковолновый («синий») компонент экспонировал маскирующий фотоматериал много меньше, чем компонент длинноволновый («красный»), то разницей между величинами паразитного средневолнового поглощения у cyan- и yellow-красок можно было хоть и с натяжкой, но пренебречь.

28.2.3 Компенсация паразитного длинноволнового поглощения

Несмотря на то что паразитные длинноволновые («красные») поглощения yellow- и magenta-красками невелики, при изготовлении cyan-сепарации (т.е. за красным фильтром) все-таки имело смысл выполнять маскирование, в результате которого трихроматические сепарации приобретали примерно одинаковую контрастность. Мы знаем, что маска, чья функция сводилась только к управлению гамма cyan-печатной

сепарации, должна была изготавливаться через красный фильтр, но на практике маска, выполненная не за красным, а за magenta-фильтром, успешно справлялась с двумя функциями, а именно: вполне удовлетворительно управляла контрастностью cyan-сепарации и заодно компенсировала паразитные поглощения magenta- и yellow-красками. Коэффициенты контрастности трех комбинаций «маскирующая фотопленка/обработка» для трихроматических (CMY) сепараций в данном случае были равными примерно 0.5 (см. рис. 28.1).

28.2.4 Маскирование отражающих сепараций

В газетной индустрии при изготовлении позитивных *отражающих* сепараций иногда применялся видоизмененный вариант описанной двухмасковой системы. При этом в роли оригиналов выступали цветные негативы.

28.2.4.1 Изготовление масок

Процедура изготовления масок состояла в том, что цветной негатив устанавливался в рамке фотоувеличителя и проектировался на его экран в соответствующие масштаб и кадр. Маска cyan-сепарации выполнялась путем экспонирования листа маскирующей фотопленки, расположенной на столике увеличителя, через красный фильтр. Маска magenta-сепарации изготавливалась тем же путем через зеленый фильтр.

28.2.4.2 Изготовление сепараций

Yellow-сепарация изготавливалась путем экспонирования специальной панхроматической *фотобумаги* под второй маской (т.е. выполненной за зеленым фильтром) и через синий фильтр. Magenta-сепарация выполнялась аналогично, но за зеленым фильтром и с использованием первой маски (т.е. выполненной за красным фильтром). Наконец, cyan-сепарация экспонировалась за красным фильтром и без какой-либо маски (высокая контрастность cyan-красочного изображения была необходима для балансировки серой шкалы — см. раздел 28.15).

Ко всему прочему, за счет долевой экспозиции за каждым из трех фильтров выполнялась black-сепарация, необходимость в которой всегда имела место, поскольку, как мы знаем, с помощью одних лишь триадных красок очень трудно получить глубокий черный. Впрочем, к использованию черной краски был еще ряд мотивов (см. раздел 26.6 и рис. 26.7).

28.3 ЧЕТЫРЕХМАСКОВАЯ СИСТЕМА

С целью достижения наиболее точных и предсказуемых результатов печати описанную выше примитивную двухмасковую процедуру спустя некоторое время усовершенствовали за счет применения четвертой маски — для «черной» сепарации (см. рис. 28.2). Остальные три маски работали так: первая выполнялась через зеленый фильтр и использовалась при изготовлении yellow-сепарации; вторая выполнялась через magenta-фильтр, но в итоге стала использоваться только при изготовлении magenta-сепарации; третья маска применялась в основном для снижения гамма cyan-сепарации (но если была сделана не за красным, а за оранжевым фильтром, то позволяла несколько снизить влияние паразитного длинноволнового поглощения magenta-краской).

Напомним, что одна маска не могла иметь разные гамма, но если оранжевый

Экспозиция маскирующей пленки:	Маска использовалась при изготовлении:	Гамма маски	Маска корректировала:
за зеленым фильтром (зеленым светом)	yellow-сепарации	0.5	паразитное коротковолновое («синее») поглощение magenta- и cyan-красками
за magenta-фильтром (смесью красного и синего света)	magenta-сепарации	0.5	паразитное средневолновое («зеленое») поглощение cyan- и yellow-красками
за оранжевым фильтром (смесью красного и зеленого света)	cyan-сепарации	0.5	коэффициент контрастности (гамма) cyan-красочного изображения, а также длинноволновое («красное») паразитное поглощение magenta-краской
за узкополосным желто-зеленым фильтром	black-сепарации	0.5	полутоновую тон-репродукционную кривую black-формы

Рис. 28.2 Упрощенная процедура маскирования, в которой маски изготавливались за зеленым, magenta и оранжевым фильтрами (а также узкополосным желто-зеленым фильтром для black-сепарации).

фильтр был подобран так, что соотношение между уровнями экспозиции маскирующего материала (задаваемыми коэффициентами пропускания этого фильтра по длинным и средним волнам) было тем же, что и соотношение между относительной значимостью гамма-контроля cyan-сепарации и относительной значимостью компенсации паразитного длинноволнового поглощения magenta-краской, — то в целом маска справлялась с двумя возложенными на нее функциями.

Коэффициенты контрастности всех комбинаций «маскирующая фотопленка/обработка» в данном случае были равными примерно 0.5.

28.4 ОБЩИЙ АЛГОРИТМ МАСКИРОВАНИЯ

Ниже мы опишем общий алгоритм маскирования, чаще всего применявшийся на практике. В качестве примера возьмем упомянутую четырехмасковую систему.

28.4.1 Изготовление масок

Вначале изготавливалась маска высоких светов (если, конечно, в ней была необходимость) (см. раздел 28.8) и с точной приводкой закреплялась на вторичном оригинальном слайде.

Связка «слайд/маска высоких светов» монтировалась на лист неэкспонированной черно-белой маскирующей пленки низкой контрастности и экспонировалась через оранжевый фильтр (в частности, Wratten 85B в связке с Wratten 81EF). Слайд прилегал к эмульсионной стороне маскирующей пленки своей подложкой (не эмульсией), чем провоцировал легкую нерезкость будущей маски: сие облегчало приводку и повы-

шало визуальную резкость финальной репродукции (см. раздел 15.3). При необходимости, большей степени нерезкости маски добивались за счет тонкой прозрачной прокладки между слайдом и маскирующей пленкой.

Далее экспонированную маскирующую пленку откладывали и приступали к экспонированию второй маски. Вторая маска изготавливалась по тому же принципу и на пленке того же типа, что и первая, но уже через magenta-фильтр (в частности, Wratten 33 в связке с Wratten 81EF). Третья и четвертая маски выполнялись так же, но через зеленый (Wratten 58) и узкополосный желто-зеленый фильтры (Wratten 90 двойной толщины) соответственно.

По завершении всех процедур все четыре маски обрабатывались в одном режиме и в одних и тех же растворах (что обеспечивало однородность результатов).

28.4.2 Изготовление сепараций

Трихроматические (CMY) негативные сепарации и негативная black-сепарация изготавливались следующим путем:

28.4.2.1 Cyan-сепарация

Вторичный слайд-оригинал (без какой-либо маски высоких светов) с точной приводкой соединялся с маской, выполненной за оранжевым фильтром, после чего печатался либо контактно, либо проекционно на листе черно-белой негативной фотопленки. Экспозиция выполнялась через красный фильтр, в частности Wratten 25. Экспонирующий свет при этом шел по следующему пути:

— подложка маски;

— серебряный слой маски;

— подложка слайда;

— красочные слои слайда;

— оптика увеличителя (если проекционно);

— эмульсия негативной фотопленки;

— подложка негативной фотопленки.

Благодаря столь большому числу рассеивающих сред маскирование оказывалось слегка нерезким, но сам слайд при этом копировался на cyan-сепарацию с вполне сносной резкостью.

28.4.2.2 Magenta-сепарация

После экспозиции cyan-сепарации лист пленки удалялся, а маска, выполненная за оранжевым фильтром, заменялась на выполненную за фильтром magenta. Экспозиция будущей magenta-сепарации выполнялась по той же схеме, но за зеленым фильтром (в частности, Wratten 58).

28.4.2.3 Yellow-сепарация

Маска, выполненная за magenta-фильтром, заменялась на слайде маской, выполненной за зеленым фильтром, и путем экспозиции за синим фильтром (Wratten 47B) изготавливалась yellow-сепарация.

28.4.2.4 Black-сепарация

Наконец, маска, сделанная за зеленым фильтром, заменялась на маску, выполненную за желто-зеленым фильтром (иногда использовался бледно-зеленый фотографический цветокомпенсационный фильтр Kodak CC50G), после чего обычным белым светом экспонировалась будущая black-сепарация.

28.4.2.5 Обработка

По завершении описанных выше процедур четыре экспонированных негатива обрабатывались раздельно (поскольку в данном случае для получения таких коэффициентов контрастности, которые при печати давали бы корректную серую шкалу, требовалось слегка разное время проявления каждой сепарации).

Принцип подбора фильтров для изготовления масок и сепараций мы обсудим в разделе 28.10.

28.5 ЦВЕТНЫЕ МАСКИРУЮЩИЕ ФОТОПЛЕНКИ

Как было показано в предыдущем разделе, когда для создания печатных сепараций с цветных слайдов применялись черно-белые маски, их приходилось оперативно менять и для каждой сепарации изготавливать свою. Однако точная приводка масок к слайду — это весьма трудоемкая и долгая процедура, поэтому были разработаны специальные *цветные* маскирующие фотопленки, дающие, как нетрудно догадаться, маскирующие голубое, пурпурное и желтое изображения.

Пленки изготавливались так, что голубое, пурпурное и желтое красочные изображения в красном свете давали маску, требуемую для производства cyan-сепарации, в зеленом свете — для производства magenta-сепарации, в синем — yellow-сепарации.

Технология изготовления трехслойной маски была следующей: вначале вторичный слайд-оригинал контактно экспонировал маскирующую фотопленку, после чего полученная тройная маска с точной приводкой монтировалась на этом же слайде. Все будущие сепарации последовательно экспонировались через эту маску, но разными световыми потоками: красным, зеленым и синим.

Очевидным преимуществом маскирующих цветных многослойных фотопленок перед четырехмасковыми системами являлось то, что:

— во-первых, цветокоррекция оказывалась более точной;

— во-вторых, для получения всех масок требовался один сеанс экспозиции;

— в-третьих, усилия по приводке маски к слайду сокращались минимум втрое;

— в-четвертых, все четыре сепарации выполнялись с помощью единой связки «слайд/маска», что избавляло от утомительных манипуляций между экспозициями каждой сепарации.

Однако поскольку цветные маскирующие фотопленки не могли обрабатываться в дешевых проявочных машинах, предназначенных для обычных черно-белых фотопленок, цветные маски, к сожалению, не нашли широкого распространения.

28.6 СИСТЕМЫ ПРЯМОГО РАСТРИРОВАНИЯ

Результатом многолетних усилий по упрощению технологических алгоритмов производства печатных форм явился перенос процедуры полутонового растрирования на этап изготовления сепараций. Главной проблемой в проведении этой реформы ока-

залось то, что растрирующая экспозиция даже при белом свете была довольно длинной, а уж выполнявшаяся с маскированных слайдов через красный, зеленый и синий фильтры — неприемлемо долгой. Эта проблема особо проявляла себя при проекционном масштабировании изображения. Однако в скором времени для изготовления растрированных сепараций разработали специальные особочувствительные черно-белые фотопленки высокой контрастности, а фотоувеличители вооружили импульсными ксеноновыми лампами высокой интенсивности. В итоге экспонирование негативов маскированными слайдами непосредственно через растр, т.е. выполнение *прямого растрирования*, стало вполне практичным (Clapper, 1964).

Последовательность операций при прямом растрировании была следующей (Clapper, 1964):

— через вторичный слайд-оригинал выполнялось контактное экспонирование маскирующих фотопленок (маски изготавливались слегка нерезкими, и при необходимости использовалась маска высоких светов).

— после обработки и сушки эти маски, сменяя друг друга, с точной приводкой монтировались на вторичный оригинальный слайд (без маски высоких светов).

— маскированный слайд помещался в рамку фотоувеличителя, а на его столике располагали панхроматическую черно-белую пленку высокой контрастности, поверх которой монтировался серый контактный растр (для обеспечения максимально плотного контакта растра с пленкой обычно применялись вакуумные рамы);

— на следующем этапе через красный (обычно Wratten 23A), зеленый (обычно Wratten 58) и синий (обычно Wratten 47B) фильтры выполнялось раздельное экспонирование каждой связки «фотопленка/растр». Управление полутоновой контрастностью сепараций осуществлялось путем дополнительной равномерной импульсной подсветки (т.н. флэшинга) по растру (при изготовлении cyan-сепарации иногда производилась дополнительная легкая подсветка через слайд; при этом растр, разумеется, предварительно удалялся).

Для балансировки серого полутоновую контрастность растрированной cyan-сепарации повышали путем *безрастровой* подсветки (Pollak, 1955). Будущая black-сепарация экспонировалась через фильтр Wratten 85B, а уровень ее экспозиции подбирался таким, чтобы черная краска присутствовала только в тех участках отпечатка, что соответствовали оптическим плотностям оригинала, бóльшим 0.8 (см. рис. 26.7).

28.7 ДВУХЭТАПНОЕ МАСКИРОВАНИЕ

До сего момента подразумевалось, что взаимоотношения цветовоспроизводящих систем с масками всегда пропорциональны оптической плотности. Иными словами, уравнения, в которых участвуют показатели оптических плотностей, всегда линейны. Однако, как было показано в разделах 15.2 и 27.8, тоновоспроизведение иногда бывает нелинейным.[1] По этой причине в доцифровой период применялись специальные нелинейные маски высоких светов, тон-коррекционная функция которых аналогична восходящему участку плеча тон-репродукционной кривой промежуточных негативных пленок, описанных в разделе 14.16 (рис. 14.5 [a]). В полутоновой цветной печати источ-

---

[1] Возможное отклонение оптических плотностей от соответствия правилам аддитивности и пропорциональности мы рассматривали в разделе 15.7, а нелинейные взаимоотношения между оптическими плотностями на отражение и пропускание у отражающих материалов — в разделе 14.22.

никами значимых нелинейных искажений оптических плотностей могли стать, в частности, технология подготовки и эксплуатации печатных форм, отличия в глянце у разных красок, а также толщина красочного слоя (своеобразный межслойный эффект).

Итак, мы видим, что нелинейное маскирование являлось вполне мотивированным, но наряду с этим вполне оправданным было и экспонирование будущих сепараций через красный, зеленый и синий фильтры с несколько расширенными полосами пропускания (против традиционных узкополосных), поскольку вносимые тем самым неаддитивность и непропорциональность оказывались весьма на руку коррекции прочих нелинейностей цветорепродукционной системы.

Одной из трудностей применения нелинейных масок являлось то, что, несмотря на общий характер нелинейности, вносимой масками в каждую из сепараций, возникала досадная паразитная подцветка серой шкалы. При изготовлении сепараций маска высоких светов оставалась общей, но цветокоррекционные маски все же должны были быть разными. Создание комплекта нелинейных масок, позволяющих уйти от подцветки серой шкалы, было весьма непростой технологической задачей, однако все перечисленные трудности удалось преодолеть за счет т.н. *двухэтапного маскирования*.

При двухэтапном маскировании комплект негативных сепараций изготавливался без всяких масок. Затем сепарации экспонировали черно-белую негативную пленку (гамма 1.0), в результате чего получались сепарированные *позитивы*. Если позитив с точной приводкой смонтировать на «своем» негативе, позитивное и негативное изображения нивелируют друг друга, оставив лишь черное поле, но если позитив закрепить на одной из других сепараций, то взаимное нивелирование будет иметь место только на тех участках, что одинаково проэкспонировали и негатив, и позитив. Равная экспозиция в первую очередь касалась серых элементов оригинала (однако иногда и некоторых хроматических). Следовательно, обсуждаемые негативно-позитивные комбинации вполне подходили изготовлению цветокоррекционных масок, причем даже если последние были нелинейны, сие не оказывало влияния на воспроизведение серой шкалы.

Одним из вариантов применения техники двухэтапного маскирования являлся следующий: мы знаем, что печатные краски часто демонстрируют выраженную неаддитивность своих оптических плотностей, к примеру, оптическая плотность за синим фильтром yellow-краски, накатанной на слой magenta, зачастую меньше суммы оптических плотностей за синим фильтром каждой краски в отдельности. Отсюда следует, что если коэффициент контрастности маски, выполненной за зеленым фильтром (использовалась при изготовлении yellow-сепарации), был подобран так, что обеспечивалась адекватная степень коррекции паразитного коротковолнового поглощения чистой magenta-краской, то сие давало избыток компенсации лишь в том случае, когда поверх magenta накатывалась желтая краска. Следовательно, цветокорректирующая маска, выполненная за зеленым фильтром, должна была иметь гамма, *снижающуюся* по мере *нарастания* количества желтой краски в том или ином участке оттиска.

Сего достигали изготавливая данную маску за счет комбинации негативной magenta-сепарации с позитивом, выполненным с сепарации yellow, и некоторого недоэкспонирования маскирующей фотопленки. Данная тактика оправдывала себя, поскольку на тех участках изображения, что не требовали участия желтой краски, сепарированный позитив оказывался светлее, и, следовательно, будущая маска в этих участках достигала уровня нормальной экспозиции и давала нормальную гамма. Однако в тех участках изображения, где требовалось присутствие желтой краски поверх magenta, сепарированный позитив был плотным, а маска оказывалась недоэкспониро-

ванной и, следовательно, с низкой гамма (подошва характеристической кривой маскирующей пленки).

Итак, мы видим, что маска, изготавливавшаяся описанным выше способом, давала нелинейную коррекцию хроматических отклонений, но при этом не оказывала влияния на серую шкалу.

Готовая маска монтировалась затем, напомним, на некорректированной негативной сепарации, давая откорректированную комбинацию. Однако контрастность серой шкалы оказывалась выше, чем при обычном одноэтапном маскировании, поскольку цветокоррекционная маска не снижала в этом случае гамма репродукции. Следовательно, возникала необходимость в принудительном снижении контрастности оттисков, для чего использовались специальные методы.

При двухэтапном маскировании единичная маска компенсировала эффекты паразитного коротковолнового поглощения cyan- и magenta-красками, если вдобавок к тому что краски отвечали требованиям тон-баланса (см. раздел 28.2), эффект неаддитивности коротковолнового поглощения цианом в присутствии желтой краски был аналогичен таковому у magenta. Данное сходство действительно иногда имеет место, что позволяло одной маске выполнять две функции.

Наконец, отметим, что принципы двухэтапного маскирования были заложены в один из возможных алгоритмов коррекции при барабанном сканировании (см. гл. 29).

28.8 ВТОРИЧНОЕ МАСКИРОВАНИЕ ВЫСОКИХ СВЕТОВ

В разделах 15.2 и 27.8 мы показали, что, при использовании гамма-редуцирующей маски для изготовления слайд-копий оригиналов, снижения контрастности в высоких светах удавалось избежать, благодаря маске высоких светов. В самом деле, слайдам свойственна тенденция к определенному снижению гамма в высоких светах, потому что последние при фотосъемке часто ложатся на подошву характеристической кривой слайд-пленки. Поскольку цветокоррекционные маски, которые будут описаны в настоящей главе, обладали эффектом снижения контрастности результирующих изображений, сие служило мотивом к повторному применению масок высоких светов (но уже при изготовлении сепараций). Обычно для этих целей использовалась единичная черно-белая маска.

Несмотря на то что единичная маска высоких светов служила весьма удобным инструментом улучшения тонопередачи в высоких светах оттисков, такая маска равновелико поднимала контрастность CMY-сепараций, чем компенсировала потери по чистоте цвета, возникающие из-за низкой дифференциальной гамма подошвы характеристической кривой. Американский исследователь Дж. Юл показал, что наилучших результатов можно добиться, применяя три разных маски высоких светов: для cyan-сепарации маска выполнялась за красным фильтром, для magenta-сепарации — за зеленым, для yellow — за синим (Yule, 1967). Однако из-за высокой трудоемкости метод не получил широкого практического распространения.

28.9 ПРОЕКЦИОННОЕ МАСКИРОВАНИЕ

Когда оригинал представлял собой отражающий отпечаток или очень маленький слайд, то приводка маски на нем оказывалась весьма затруднительной. В этом случае маскирование удавалось выполнить за счет того, что маска приводилась не к оригиналу,

а к проекционному *изображению* оригинала, получаемому в репродукционном фотоаппарате либо при фотоувеличении. Метод получил название *проекционного маскирования*.

Основные принципы проекционного маскирования те же, что у маскирования контактного. Однако мы знаем, что из-за паразитной подсветки в объективе камеры или увеличителя проекционное изображение оригинала всегда отличается от самого оригинала. Поэтому приходилось выбирать определенную гамма маскирующей фотопленки или пленки, используемой для изготовления сепараций.

Основной сложностью проекционного маскирования являлось то, что свет, образующий изображение, перед тем как экспонировать сепарационную фотопленку, проходил через маску, что вело к определенной потере резкости, если, конечно, не принимались специальные меры. Последние, к примеру, состояли в экспонировании черно-белой серебряной маски, при изготовлении ее с отражающих оригиналов, через подложку маскирующей фотопленки, то есть так, чтобы эмульсионные стороны обеих оказывались в тесном контакте (желательно за счет вакуума).

28.10 ПОДБОР ФИЛЬТРОВ

Кривые спектрального поглощения триадных красителей (cyan, magenta и yellow), применяемых в полиграфии, существенно отличаются от соответствующих кривых красителей фотопленок и фотобумаг. Спектральные полосы пропускания фильтров, о которых речь шла в разделе 28.4, были весьма узкими, что порождало определенные сложности, особенно когда у cyan-красителей оригинала и репродукции сильно разнились характеры поглощения в дальнем, длинноволновом, конце спектра. Поэтому репродукции двух визуально одинаковых оригиналов, но выполненных на разных фотоматериалах, получались одинаковыми только в том случае, когда спектральные чувствительности маскирующих фотоматериалов за соответствующими фильтрами, а также фотоматериалов, используемых для изготовления сепараций, — представляли собой набор трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (см. разделы 7.4 и 8.3) или одну из их линейных комбинаций (условие Лютера —Айвса) (см. раздел 9.5).

Применимость тех или иных фильтров (то есть степень аппроксимации ими трихроматических кривых Стандартного наблюдателя) оценивали, определив величину т.н. *коэффициента колориметрического качества* (*q-фактора*) (см. раздел 9.5). В результате такого исследования выяснилось, что в разных ситуациях оптимальными оказывались фильтры разных марок, к примеру, в ряде ситуаций для изготовления cyan-сепарации фильтр Wratten 23A оказывался предпочтительнее популярного фильтра Wratten 25.

28.11 УПРАВЛЕНИЕ МАСКИРОВАНИЕМ

Очевидно, что эффективный контроль процесса маскирования был исключительно важен, и потому в свое время специально разработали систему такого контроля, получившую название *Kodak Three-Aim-Point* («три контрольных точки»). Стандартизированные процедуры этой системы позволяли получать сепарированные негативы, печать с которых была устойчива по тональному и хроматическому балансам (Clapper, 1962). Идея состояла в том, что тоновые кривые трихроматических негативных сепараций приводились в соответствие тоновой кривой некоего стандартного оригинала. Роль черной сепарации при этом сводилась к подгонке изображений к различным диапазонам оптиче-

ских плотностей: когда динамический диапазон оригинала был мал — использовали черную сепарацию, дающую малый выход черного; когда велик — наоборот.

Стандартный «оригинал» системы Three-Aim-Point представлял собой набор из трех хроматически нейтральных образцов разной оптической плотности: образец «A» соответствовал оптической плотности белой точки (вуали) слайда или отражающего отпечатка, образец «B» — оптической плотности черной точки, образец «M» — средней оптической плотности. Образцы монтировались вдоль верхней границы оригинального изображения до выполнения масок и, следовательно, впечатывались как в маски, так и в сепарации.

Опытным путем были выведены стандартные значения оптических плотностей репродукций контрольных образцов и коридоры допустимого колебания этих плотностей (табл. 28.1). Отметим, что значения по cyan-сепарации отличались от значений по сепарациям magenta и yellow, поскольку в типичных полиграфических процессах для балансировки серой шкалы чаще всего требуется, чтобы cyan-сепарация обладала несколько большей контрастностью, чем magenta и yellow.[1]

При эмпирической отладке маскирующих процедур по краю рабочего поля наряду с нейтральными старались поместить окрашенные образцы: если печатные краски удовлетворяли требованиям пропорциональности и аддитивности, то ограничивались cyan-, magenta- и yellow-патчами. Маскирование обычно отлаживалось так, что cyan-образец воспроизводился только на маскированной cyan-сепарации, magenta-образец — на magenta-сепарации, а yellow — на yellow-сепарации. Затем выполнялась полная коррекция паразитных поглощений красками контрольных образцов.

Цветовая репродукция получалась удачной тогда, когда оригинал состоял из тех же красителей, что и контрольные образцы, то есть, к примеру, если оригинал представлял собой слайд, то было желательно, чтобы контрольные патчи состояли из красителей, имеющих те же паразитные поглощения, что и красители слайда.

Если краска не удовлетворяла требованиям аддитивности и пропорциональности, то использовалось шесть образцов: три собственно колорантных (голубой, пурпурный и желтый) и три парносмесевых или, как говорят, *бинарных* (голубой + пурпурный; голубой + желтый; пурпурный + желтый). Управление маскированием строилось на том, что моноколорантные патчи воспроизводились только на «своей» сепарации, а бинары только на соответствующих двух сепарациях. Сие зачастую требовало нелинейного маскирования, в частности двухэтапного. Следует отметить, однако, что даже тогда, когда и моноколорантные патчи, и бинары ложились только на соответствующе сепарации, промежуточные смеси красок давали определенные погрешности, хотя и небольшие.

28.12 ФАКТИЧЕСКИЕ КРАСКИ

28.12.1 Спектральные свойства триадных полиграфических красок

На рис. 28.3 показаны спектральные оптические плотности на отражение типичных голубой (cyan), пурпурной (magenta) и желтой (yellow) полиграфических красок, а также (внизу) спектральные оптические плотности на пропускание фильтров Kodak

---

[1] Дело в том, что большинство magenta- и yellow-красок обладают весьма слабым паразитным поглощением в длинноволновой части спектра; следовательно, в тех участках изображения, что должны воспроизводиться нейтрально-серыми, практически все паразитное длинноволновое поглощение приходится на cyan-краситель.

ТАБЛИЦА 28.1 Типичные оптические плотности при управлении маскированием по трем контрольным точкам

Контрольный образец	На слайдах	На отражающих отпечатках	На масках, выполненных со слайдов	На масках, выполненных с отражающих отпечатков	На сепарациях		
					C	M и Y	Black
A	0.4	0	1.15	0.80	1.70	1.55	
B	2.4	1.6	0.25	0.20	0.30	0.30	от 0.50 до 0.90
A-B			0.90 ± 0.05	0.60 ± 0.05	1.40	1.25	
M	1.3	0.7	0.80	0.50	0.90	0.90	
A-M			0.35	0.30	0.80 ± 0.05	0.65 ± 0.05	
M-B			0.55	0.30	0.60 ± 0.05	0.60 ± 0.05	от 0.60 до 0.90
M-B–(A-M)			0.20 ± 0.05	0.00 ± 0.05			

Wratten 25 (красный), 58 (зеленый) и 47 (синий). Мы видим, что у всех трех имеются паразитные поглощения: у magenta-краски вдобавок к полезному поглощению в средневолновой («зеленой») части видимого спектра имеет место заметное паразитное поглощение в коротковолновой («синей») его части; у cyan-краски наряду с полезным поглощением в длинноволновой («красной») части спектра имеется явное паразитное поглощение в средневолновой («зеленой») части; желтая краска демонстрирует наилучшие показатели — ее паразитные поглощения в длинноволновой («красной») и средневолновой («зеленой») частях видимого спектра едва выражены.

Однако, несмотря на то, что спектральные свойства красок основополагающи, существуют и иные факторы, влияющие на их выбор для той или иной работы, к примеру: вязкость, скорость высыхания, светостойкость и стоимость. Стоит сказать, что в реальной практике по сей день применяются триадные краски весьма широкого диапазона свойств.

28.12.2 Погрешность цветового тона и степень ахроматичности красок

Поскольку маскирование, применявшееся при изготовлении сепараций, ориентировалось в основном на компенсацию паразитных поглощений, то будет весьма кстати классифицировать цветовоспроизводящие свойства красок в показателях их *зональ-*

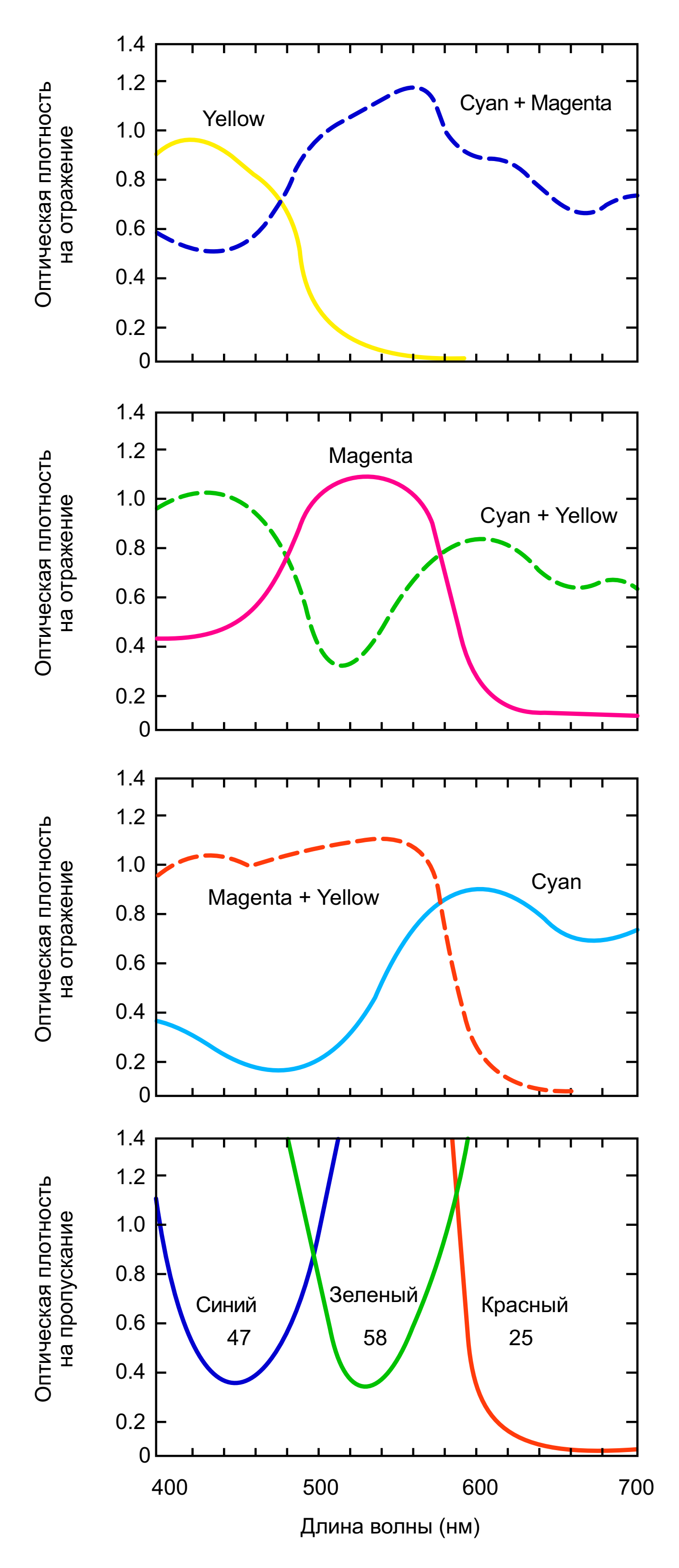


Рис. 28.3 Кривые спектральной оптической плотности типичных триадных полиграфических красок, а также красного, зеленого и синего фильтров Kodak Wratten 25, 58 и 47 соответственно.

ных оптических плотностей, т.е. оптических плотностей, измеренных за красным, зеленым и синим фильтрами (такими, как Kodak Wratten 25 — красный, 58 — зеленый, 47 — синий). Типичный набор таких плотностей дан в таблице 28.2 (Yule, 1967).

Из зональных оптических плотностей можно легко вычислить значения двух весьма полезных показателей: *коэффициента погрешности цветового тона* и *коэффициента ахроматичности* (Preucil, 1957):

$$\text{Коэффициент погрешности цветового тона} = 100\frac{M-L}{H-L}$$

$$\text{Коэффициент ахроматичности} = 100\frac{L}{H}$$

где H — наибольшая оптическая плотность той или иной краски как сумма оптических плотностей за красным, зеленым и синим фильтрами; M — средняя оптическая плотность; L — минимальная.

Если, предположим, краска не имеет паразитных поглощений, то величины M и L окажутся равными нулю, и, следовательно, коэффициент погрешности цветового тона и коэффициент ахроматичности тоже окажутся равными нулю.

Если у краски имеются паразитные поглощения, но величина их одинакова, то $M = L \neq 0$. В этом случае коэффициент погрешности цветового тона будет равен нулю, но коэффициент ахроматичности приобретет некое значение, отличное от нуля. В такой ситуации мы говорим, что данная краска является идеальной (т.е. условно без паразитных поглощений), но смешана при этом с некоторым количеством идеально-серой краски (что ведет к определенному снижению чистоты цвета, но не к искажению цветового тона).

Если у краски имеются паразитные поглощения, не равные друг другу, то понятно, что M будет больше L, а коэффициент погрешности цветового тона окажется не равным нулю. О такой краске мы условно говорим как об идеальной, но смешанной с некоторым количеством идеально-серой краски и некоторым количеством одной из оставшихся условно идеальных красок триады. К примеру, о magenta-краске из табл. 28.2 мы говорим как об эквиваленте комбинации идеально-серой краски оптической плотности 0.11 с идеальной yellow-краской оптической плотности 0.45 (0.56 — 0.11) и идеальной magenta-краской оптической плотности 0.98 (1.09 — 0.11). Итак, обсуждаемая magenta-краска отличается от идеальной условной примесью идеально-серой краски (коэффициент ахроматичности 0.11/1.09×100 = 10.1) и уклоном в желтый тон (коэффициент погрешности цветового тона 0.45/0.98×100 = 45.9).

Коэффициенты ахроматичности и погрешности цветового тона по каждой фактической краске триады даны в табл. 28.2: мы видим, что у желтой краски эти показатели наименьшие, в то время как у пурпурной — наибольшие.

Погрешности цветового тона каждой из триадных красок всегда однонаправленны. У голубой они ориентированы в синем направлении (эквивалентно паразитной добавке magenta), у пурпурной — в красном (эквивалентно паразитной добавке yellow), у желтой также в красном (эквивалентно паразитной добавке magenta).

Сказанное проиллюстрирует рис. 28.4: направление искажения цветового тона типичных триадных красок — это смещение по окружности диаграммы, а коэффициент ахроматичности — это расстояние от окружности (нулевой коэффициент ахроматичности) в направлении центра этой окружности (100% ахроматичности).

ТАБЛИЦА 28.2 Оптические плотности типичных полиграфических красок, измеренные за красным, зеленым и синим фильтрами Kodak Wratten 25, 58 и 47

Краска	За красным (25)	За зеленым (58)	За синим (47)
Cyan	1,2	0,37	0,17
Magenta	0,11	1,09	0,56
Yellow	0,01	0,06	0,96
Cyan + Magenta	1,33	1,44	0,67
Magenta + Yellow	0,11	1,22	1,61
Cyan + Yellow	1,29	0,43	1,19
Cyan + Magenta + Yellow	1,31	1,53	1,66
Cyan + Magenta + Yellow + Black	1,6	1,83	1,9
	Cyan	Magenta	Yellow
Коэффициент ахроматичности	14,2	10,1	1
Коэффициент погрешности цветового тона	19,4	45,9	5,5

28.13 СУБТРАКТИВНЫЙ ТРЕУГОЛЬНИК ЦВЕТНОСТЕЙ

Если оптические плотности красок, измеренные за красным и зеленым фильтрами, записать в виде отношения к сумме трех зональных оптических плотностей (D_R, D_G и D_B):

$$r = D_R / (D_R + D_G + D_B),$$
$$g = D_G / (D_R + D_G + D_B)$$

то можно построить диаграмму с осями «g» и «r» (рис. 28.5 [а]), расположенными под углом 60° друг к другу. Такую диаграмму часто называли *субтрактивным треугольником цветностей* (Preucil, 1960), в вершинах которого расположены позиции цветностей идеальных красок C_O, M_O и Y_O (т.е. красок, не имеющих паразитных поглощений). Если оптические плотности красок отвечают требованиям аддитивности и пропорциональности (см. рис. 15.7), то цветность любой краски будет представлена в этом треугольнике единичной точкой, причем вне зависимости от того, какова толщина слоя этой краски на поверхности. Цветности красочных бинаров будут представлены точками, лежащими на линии, соединяющей точки цветностей соответствующих красок.

В субтрактивном треугольнике локусы постоянного коэффициента погрешности цветового тона и постоянного коэффициента ахроматичности представляют собой

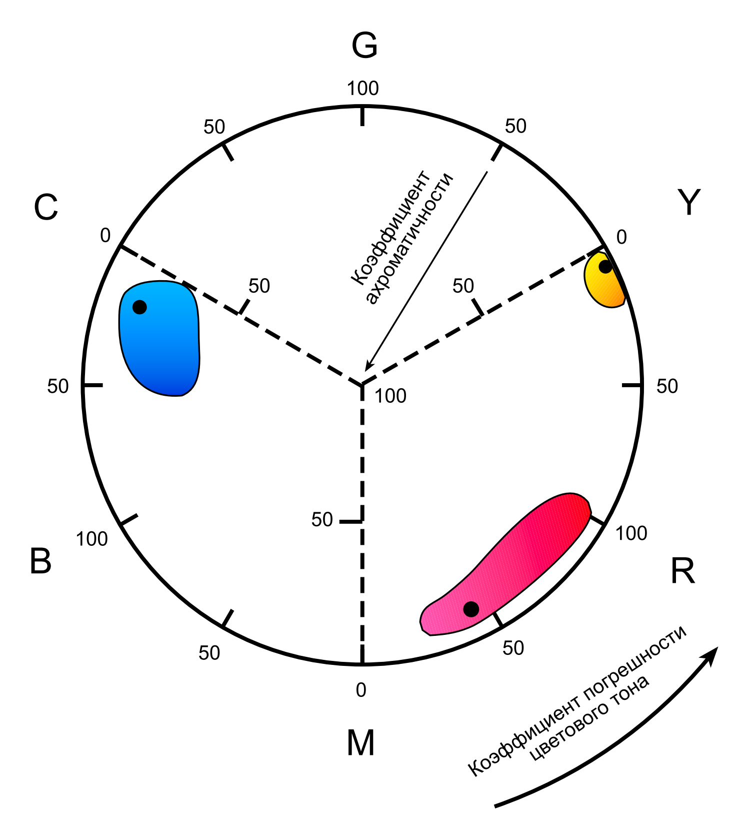


Рис. 28.4 Коэффициенты искажения цветового тона (углы отклонения от нулевых осей) и ахроматичности (удаление от окружности к центру) типичных полиграфических триадных красок (табл. 28.2), а также диапазоны возможных значений у красок разных производителей (закрашенные области).

прямые линии (рис. 28.5 [b]), что является весьма удобной альтернативой диаграмме рис. 28.4.

Субтрактивный треугольник цветностей долгое время являлся простейшим графическим методом определения требуемой контрастности масок, использовавшихся для компенсации паразитных поглощений красками (рис. 28.5 [c]): позиции цветностей корректируемых красок отмечены точками C, M и Y; точка b_g (37%) — это отношение гамма маски, выполненной за зеленым фильтром и использовавшейся при изготовлении негативной yellow-сепарации, к гамма yellow-сепарации; точка g_r (24%) — это отношение гамма маски, выполненной за красным фильтром и использовавшейся при изготовлении негативной magenta-сепарации к гамма magenta-сепарации; r_g, b_r, r_b и g_b — аналогичные отношения для прочих масок.

28.14 СТАНДАРТНЫЕ КРАСКИ

То, что краски отличаются друг от друга по своим колориметрическим свойствам влияет не только на цветовой охват воспроизводимых изображений, но также и на оптимальные гамма масок. Поскольку коррекция сепараций могла выполняться в одном месте, а изготовление форм и печать — в другом (подчас даже в другой стране), требовалась определенная стандартизация колориметрических показателей триадных колорантов.

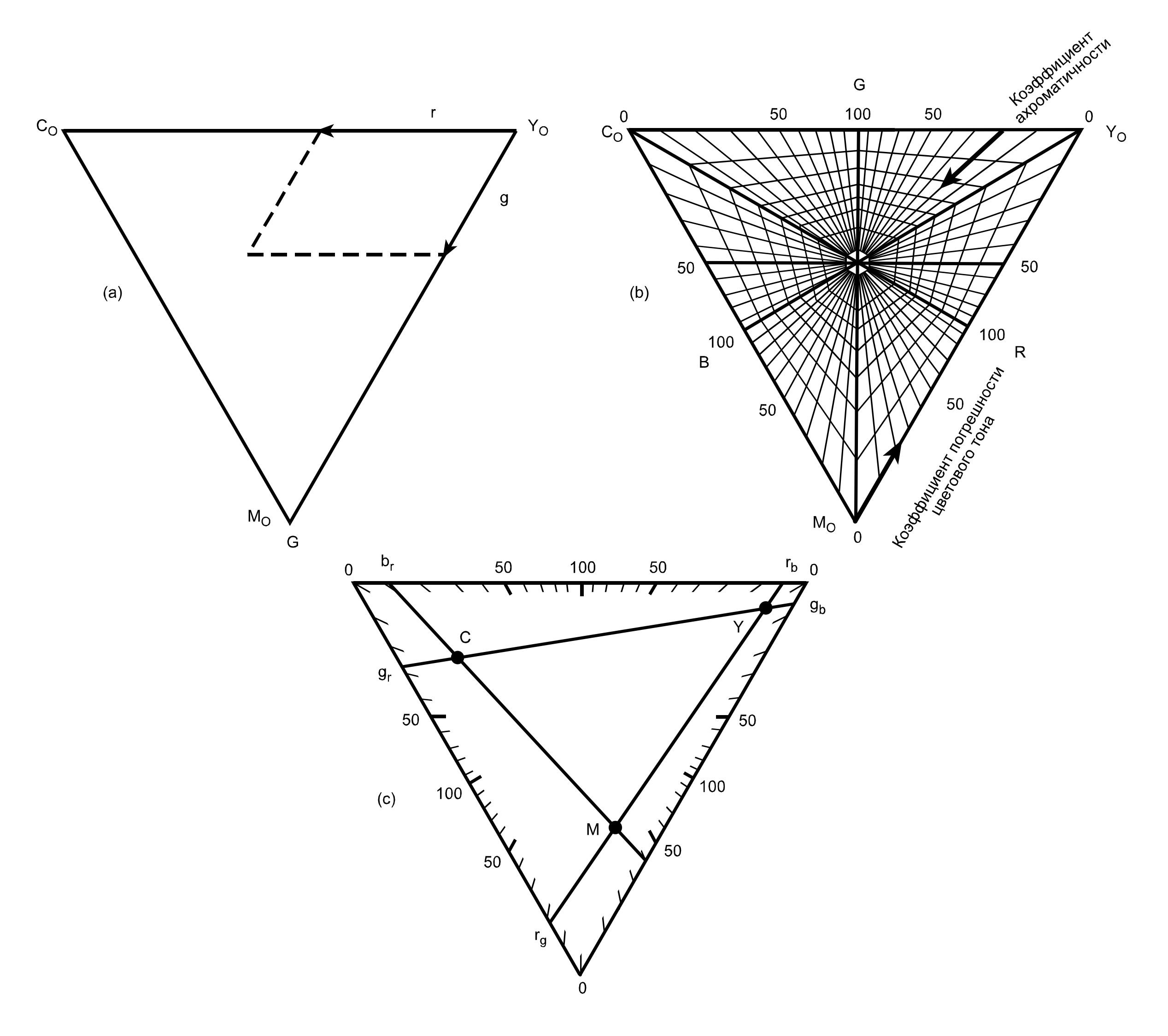


Рис. 28.5 Субтрактивный треугольник цветностей.

В 1966 г. Европейский полиграфический комитет (Comité Europeén d`Imprimerie — CEI) стандартизировал колориметрические и перцепционные показатели стимулов, воспроизводимых голубой, пурпурной и желтой полиграфическими красками, а также их бинарами (создающими красный, зеленый и синий стимулы) при стандартном D_{65}-освещении. Плюс к тому были стандартизированы соответствующие допуски (ΔD), выраженные в показателях формулы цветовых отличий $U^*V^*W^*$ (см. раздел 8.8).

Стандартные значения колориметрии красок и допуски на возможные их отклонения даны в табл. 28.3. Данные соответствуют толщине слоя в 1 мкм по каждой краске, нанесенной на белую двухстороннюю мелованную светостойкую бумагу плотностью не менее 150 г/м², не содержащую оптических отбеливателей и древесной массы (European Standard C.E.I. 12:66, 1966; British Standard 4160: 1967; European Standard C.E.I. 13:67, 1967; British Standard 4666: 1971; International Standard Organization, ISO 2845 и 2846, 1975).

ТАБЛИЦА 28.3 Колориметрические координаты (xyY) стимулов, воспроизводимых CEI-стандартными триадными красками, и цветовые координаты этих стимулов ($U^*V^*W^*$) в стандартных условиях просмотра

	x	y	Y	U^*	V^*	W^*	ΔD
Yellow	0,437	0,494	77,8	19,1	70,9	89,7	2,3
Magenta	0,464	0,232	17,1	112	−12,7	47,4	5
Cyan	0,153	0,196	21,9	−54,5	−50,9	52,9	3
Magenta поверх Yellow	0,613	0,324	16,3	139,8	21,8	46,4	7,3
Cyan поверх Yellow	0,194	0,526	16,5	−69,1	28,1	46,7	5,3
Cyan поверх Magenta	0,179	0,101	2,8	−3,6	−35,4	18,1	8

Краски, отвечающие приведенным стандартам, тем не менее могут иметь самые разнообразные спектральные коэффициенты поглощения, что в доцифровой период вело к ощутимым различиям в результатах воспроизведения промежуточных стимулов (т.е. не входящих в стандартную шестерку из табл. 28.3). Отметим, что если колориметрическую спецификацию красок ограничить одной лишь триадой, то упомянутая проблема явила бы себя в полной мере, но поскольку дополнительно специфицировали колориметрию триадных бинаров, нежелательный эффект удалось существенно снизить.

Наконец, отметим, что характер стимулов, воспроизводимых красками при том или ином освещении, зависит от ряда факторов, в частности, от типа запечатываемой поверхности (чаще — бумаги), поскольку стимул, ею создаваемый, влияет на спектральный состав красочных стимулов. Плюс к тому ощутимое влияние оказывает величина впитывающей способности запечатываемой поверхности и фактура последней. На воспроизводимые стимулы также оказывает влияние толщина красочного слоя (которая на практике обычно меньше 1 мкм).

28.15 ОБЩАЯ СХЕМА ДОПЕЧАТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Вспомним, что маскирование давало ожидаемый эффект только при строгом учете параметров фактического печатного процесса. Мы говорили также об основных параметрах красок (которые следует знать заранее), однако в дополнение к тому нам предстоит обсудить такой показатель, как *удельный вес* краски, переносимой на запечатываемую поверхность, а также такие феномены, как *растискивание*, *трэппинг* и *смазывание*.

Растискивание — это эффект роста оптической плотности того или иного участка оттиска по отношению к предполагаемой оптической плотности, *вычисленной* из известной оптической плотности краски с учетом диаметра растровых точек сепарации (см. раздел 33.3). Основные факторы, влияющие на растискивание, — это толщина красочного слоя, физические свойства красок (такие, как вязкость) и свойства запечатываемой поверхности (такие, как величина светорассеяния, зависящая от глянцевости/матовости этой поверхности).

Трэппинг — это эффект изменения оптической плотности паттерна растровых красочных точек в зависимости от того, на что легла краска — непосредственно на бумагу либо же поверх слоя другой краски.

Смазывание — это направленное искажение формы растровых точек, вызванное натиском печатной формы.

С учетом перечисленных факторов допечатные мероприятия состояли из следующих технологических этапов:

1. Определение оптимального значения удельного веса краски, что всегда являлось компромиссом между высоким качеством изображений, получаемым при высоком удельном весе, и устойчивой работой печатной машины — при малом.

2. Определение оптимальной полутоновой контрастности сепарированных негативов (т.е. обеспечивающей полную ахроматичность всех элементов изображения, которые должны были воспроизводиться серыми) путем печати серии околонейтральных патчей различной оптической плотности (с учетом эффектов растискивания и трэппинга). Напомним, что при этом из-за наличия паразитных поглощений полутоновая контрастность cyan-сепарации оказывалась выше, чем у сепарации magenta, а у той, и у другой — выше, чем у yellow-сепарации.

3. Тонопередача серой шкалы регулировалась специальными методами, в частности по трем контрольным точкам (Kodak Three-Aim-Point; см раздел 28.11). При этом, как правило, происходила некоторая компрессия динамического диапазона оригинального изображения в априори меньший динамический диапазон цветорепродукционной системы.

4. Подбор цветокорректирующих масок, если говорить о традиционных методах маскирования, ограничивался одной из описанных ранее стандартных процедур.

28.16 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ КРАСКИ

В высококачественной печати наряду с триадными иногда применяются дополнительные краски. Краски эти могут быть «золотыми» и «серебряными», то есть придающими поверхности блеск, ассоциируемый наблюдателем соответственно с золотом или серебром. Это могут быть также краски, воспроизводящие стимул точно заданного цвета (в данных условиях освещения), например фирменного цвета той или иной компании (если воспроизведение такого стимула обычными триадными средствами невозможно или сильно затруднено). Еще одной областью применения дополнительных красок является репродуцирование оригинальных живописных полотен, отдельные элементы которых могут оказаться вне цветового охвата традиционной триадной печати.

В свое время было показано (Paul, 1944), что лучшими дополнительными красками, существенно расширяющими цветовой охват репродукции, являются:

— оранжевая (дает стимулы больших светлоты и полноты цвета, чем смесь yellow и magenta);

— сине-зеленая (дает стимулы больших светлоты и полноты цвета, чем смесь cyan и yellow);

— фиолетовая (дает стимулы больших светлоты и полноты цвета, чем смесь cyan и magenta).

Отметим также, что для применения экстратриадных красочных комплектов приходилось разрабатывать специальные алгоритмы подбора растровых процентовок по

каждой краске, поскольку в данном случае в трех колориметрических уравнениях получалось больше трех неизвестных (см. также MacDonald, Deane и Rughani, 1994).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

British Standard 4160: 1967, Inks for letterpress three- or four-colour printing (1967).
British Standard 4666: 1971, Inks for offset three- or four-colour printing (1971).
Clapper, F.R., Tech. Assoc. Graphic Arts, 14, 107 (1962).
Clapper, F.R., J. Phot. Sci., 12, 28 (1964).
Clark, W., Penrose Annual, 46, 125 (1952).
European Standard C.E.I. 12: 66, European range of primary colours for letterpress printing (1966).
European Standard C.E.I. 13: 67, Gamme europen d'encres d'imprimerie pour l'offset (1967).
Gresham, D.C., Phot. J., 92B, 91 (1952 a).
Gresham, D.C., Penrose Annual, 46, 77 (1952 b).
Gresham, D.C., Penrose Annual, 50, 102 (1956).
International Standards Organization, Sets of printing inks for letterpress and offset printing colorimetric characteristics, ISO 2845 and 2846 (1975).
Hartsuch, P.J., Tech. Assoc. Graphic Arts., 10, 29 (1958).
MacDonald, L.W., Deane, J.M., and Rughani, D.N., J. Photogr. Sci., 42, 97 (1994).
Paul, A., private communication (1994).
Pollak, F., J. Phot. Sci., 3, 112 (1955).
Pollak, F., J. Phot. Sci., 49, 65 (1956).
Preucil, F., Research Progress, No. 38, Lithographic Technical Foundation, Chicago (1957).
Preucil, F., Tech. Assoc. Graphic Arts, 12, 151 (1960).
Staehle, H.C., Tech. Assoc. Graphic Arts, 4, 143 (1952).
Yule, J.A.C., Tech. Assoc. Graphic Arts, 5, 94 (1953).
Yule, J.A.C., Principles of Color Reproduction, Wiley, New York (1967).

29 СЕПАРИРУЮЩЕЕ СКАНИРОВАНИЕ

29.1 ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие электронно-вычислительной техники и появление возможности оперировать электрическими сигналами при выполнении разного рода математических расчетов привели к тому, что в полиграфии появились электронно-оптические устройства, именуемые *сканерами*. Сканеры позволили поточечно преобразовывать визуальную информацию, заложенную в изображение, в набор электрических сигналов, а после — реконструировать это изображение в той или иной форме, в частности в виде трихроматических сепараций. То есть т.н. *сепарирующие сканеры* выступили в роли промежуточной электронно-оптической инстанции между оригиналом и его печатной репродукцией.

На электронном этапе цветорепродукционного процесса сепарирующие сканеры с ничем не ограничиваемой гибкостью исполняли процедуры, эквивалентные тоновой коррекции изображения и его маскированию, и могли использоваться для изготовления полностью откорректированных контонных и полутоновых сепараций (последние выполнялись путем экспонирования через контактный растр либо с помощью цифровых электронных систем, способных отрисовывать растровые точки высокого разрешения).

Как и в телевидении, для конверсии оригинального изображения в набор электрических сигналов требовалось преобразовать это изображение из двухмерного массива данных в одномерный. Нетрудно догадаться, что сие практичнее всего было выполнять путем развертки последовательных строк.

К счастью, полиграфия не требует сканирования со скоростями цветного телевидения, но, вместе с тем, она нуждается в много большем разрешении изображений, из-за чего процесс сканирования занимает минуты (а порой и часы). Количество строк при этом обычно варьирует в пределах от 200 до 1000 на дюйм.

Первые сканеры были сконструированы на основе изобретений американских исследователей Гарди и Вурцбурга (Hardy и Wurzburg, 1948), а также Мюррея и Морса (Murray и Morse, 1941). Сканер Гарди — Вурцбурга выпустила фирма Interchemical Corporation, а в дальнейшем его производила компания Radio Corporation of America. Сканер Мюррея — Морса в своих ранних модификациях выпускался Eastman Kodak Company, в дальнейшем — Time Incorporated, а также ее дочерней компанией Printing Developments Incorporated (PDI).

Итак, с целью исторической ретроспекции вопроса мы вначале расскажем о сканерах Гарди — Вурцбурга и Мюррея — Морса, после чего перейдем к обсуждению более поздних и более совершенных методов сепарирующего сканирования изображений.

29.2 СКАНЕРЫ ГАРДИ — ВУРЦБУРГА

В своем оригинальном исполнении сканер Гарди — Вурцбурга выдавал растрированные листовые сепарации, с которых изготавливались печатные формы. Однако

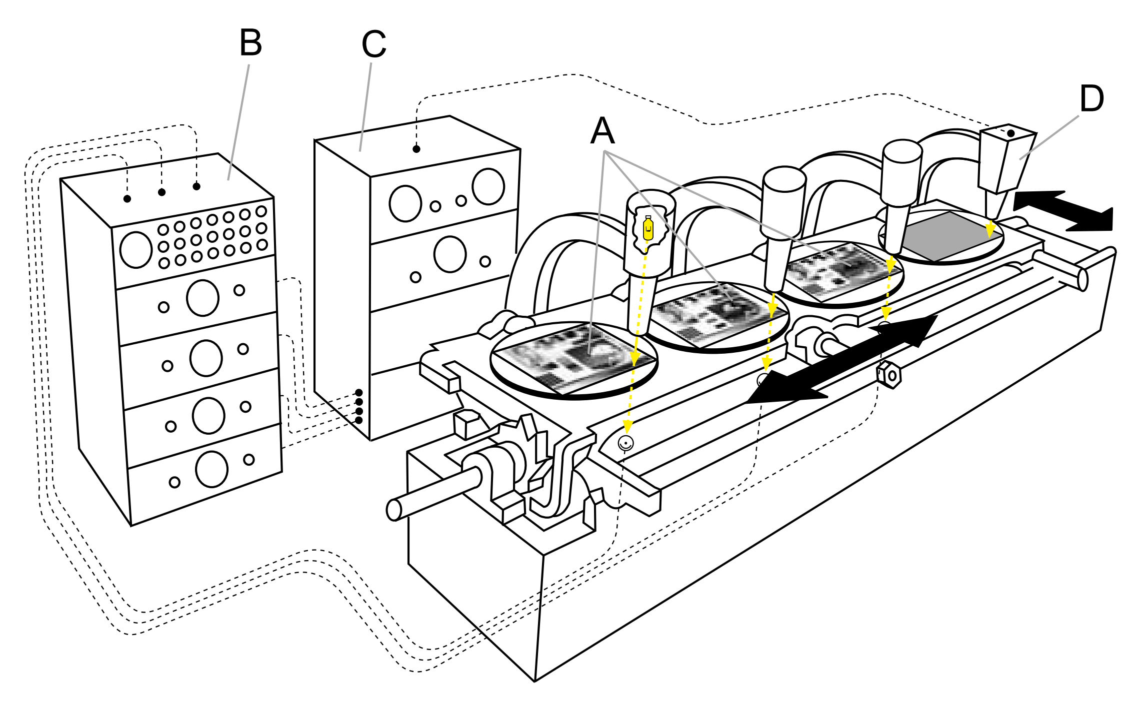


Рис. 29.1 Планшетно-механический сканер Interchemical Corporation, работавший по принципу Гарди — Вурцбурга и производивший откорректированные полутоновые и контонные сепарации.

позднее акцент сделали на получении сепараций непрерывного тона. В обоих случаях листовые пленки были полностью компенсированными (в плане устранения тональных и хроматических искажений, вносимых в оттиск запечатываемой поверхностью и красками), т.е. не требовали никаких дополнительных манипуляций.

Метод Гарди — Вурцбурга в его трактовке Interchemical Corporation показан на рис. 29.1 (Allen, 1958 [a] и 1958 [b]): на специальной каретке монтировались четыре листовых фотопленки, три из которых представляли собой контонные позитивные (или негативные) сепарации репродуцируемого оригинала, выполненные традиционным фотооптическим способом (A), а четвертая — лист неэкспонированной черно-белой фотопленки. Каретка двигалась вперед-назад с амплитудой, равной ширине сепараций, слегка смещаясь при этом вдоль их длинной стороны. В итоге вся поверхность изображений покрывалась матрицей параллельных строк.

Над сепарациями были неподвижно закреплены три прожектора, фокусировавшие на поверхности пленок световую точку. Прожекторы были так расположены относительно пленок, что светили строго в одну и ту же пространственную позицию «своей» сепарации, которая соответствовала одному и тому же пространственному участку оригинала.

Кривые эффективной спектральной чувствительности фотопленок были отрегулированы так, что полностью совпадали с трихроматическими кривыми Стандартного наблюдателя $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, благодаря чему коэффициенты пропускания сепараций в каждой точке несли в себе информацию о трехстимульных значениях оригинала ($X_pY_pZ_p$) в этих точках. Свет, прошедший через сепарации, падал на три фотоэлемента, откликавшиеся, в свою очередь, тремя сигналами, конвертирующими информацию об X_pY_p и Z_p в электронную форму. Сигналы отклика фотоэлементов поступали в схему (B), куда заранее были вшиты XYZ-значения восьми стимулов, возникающих под

стандартным освещением при восьми возможных вариантах наложения растровых красочных точек оттиска ($X_1Y_1Z_1 \dots X_8Y_8Z_8$).

Количества краски, необходимые для воспроизведения стимула с трехстимульными значениями $X_pY_pZ_p$, рассчитывались по уравнениям Нойгебауера в показателях соответствующих *cmy*-значений (см. раздел 26.7).

Сепарации экспонировались *последовательно*, т.е. когда требовалось проэкспонировать, к примеру, cyan-сепарацию, расчетные *c*-значения поступали во вторую схему (C), благодаря чему экспонирующий свет, испускаемый D-прожектором, модулировался так, что на неэкспонированной пластине получалось требуемое изображение.

29.2.1 Последовательность операций

Последовательность действий при получении репродукции была следующей:

1. Оригинал без всяких масок перефотографировался на черно-белые листовые пленки, эффективные спектральные чувствительности которых были эквивалентны $\bar{x}(\lambda)$-, $\bar{y}(\lambda)$-, $\bar{z}(\lambda)$-кривым (или любой их линейной комбинации, поскольку электронные схемы сканера легко выполняли линейный переход к этим кривым).

2. Экспонированные листы проявлялись, а с полученных сепарированных контонных негативов получали три сепарированных позитива (также непрерывного тона).

3. Позитивы монтировались на каретке сканера, сканировались, данные с фотоэлементов по мере сканирования поступали в B-схему, где рассчитывались *c*-значения. Последние поступали в C-схему, управлявшую интенсивностью D-прожектора, экспонировавшего соответствующую сепарацию.

4. Аналогичным путем вычислялись *m*-значения и экспонировалась *m*-сепарация.

5. То же по *y*-сепарации.

6. Экспонированные сепарации проявлялись.

7. Изготавливались растрированные печатные формы.

29.2.2 Обеспечение уровня колориметрической точности

Уровень колориметрического репродуцирования оригинала с помощью сканера Гарди — Вурцбурга достигался при следующих условиях:

1. Коэффициенты пропускания позитивных сепараций по каждой точке должны были быть пропорциональны трехстимульным значениям оригинала ($X_pY_pZ_p$) по этим же точкам (или линейной комбинации этих значений).

2. Результирующие растровые розетки оттиска должны были воспроизводить не больше и не меньше восьми цветовых стимулов, причем в требуемых колориметрических количествах. Однако же впоследствии американские исследователи Клаппер и Юл (Clapper и Yule, 1953) показали, что переотражения света между слоями краски и волокнами бумаги создают дополнительные стимулы, что несколько дискредитирует простую восьмистимульную теорию (см. раздел 26.7). Нелинейности, вносимые в процесс на стадии изготовления печатных форм, было довольно трудно оценить и учесть, и добивались сего путем внесения поправок на электронном этапе работы.

3. Система «бумага — краски — освещение» должна была воспроизводить стимулы с трехстимульными значениями, посылаемыми из электронной схемы сканера. Безусловно, некоторые стимулы, создаваемые оригиналом при том или ином освещении, могли выходить за границы охвата печати, но это ограничение свойственно всем системам, воспроизводящим отражающие оттиски: как было показано в разделе 13.10,

обычный динамический диапазон отражающих отпечатков составляет порядка 35:1, то есть 1.55D, а в некоторых случаях он едва превышает 1.0D.[1]

* * *

В версии метода Гарди — Вурцбурга от Radio Corporation of America (RCA) сепарации оставались неподвижны и экспонировались светящейся точкой электронно-лучевых трубок (Rydz и Marquart, 1954).

Отметим также, что независимо от варианта интерпретации метода для получения корректной цветовой репродукции оригинала наряду с трихроматическими сепарациями требовалось изготовление сепарации black (Rydz и Marquart, 1955).

В заключение раздела стоит сказать, что знакомство с давно устаревшими и неиспользуемыми сегодня сканерами дает крайне важный исторический экскурс: несмотря на множество технологических неудобств, цветовые репродукции, выполненные с помощью этих аппаратов, отличались высочайшим качеством (Haynes, 1952; Ohler, 1955).

29.3 PDI-СКАНЕРЫ

PDI-сканер, разработанный компанией Printing Developments Incorporated на основе идеи Мюррея — Морса (одно время распространялся под торговой маркой Time-Life Springdale), был аналогичен сканеру Гарди — Вурцбурга тем, что дробил оригинальное изображение на серию строк, конвертировал модуляции яркости сканирующего луча в набор электрических сигналов, выполнял с последними корректирующие операции, а затем экспонировал сепарации. Однако же по всем остальным параметрам аппарат принципиально отличался:

— во-первых, он сканировал цветные слайд-оригиналы, а не черно-белые сепарации;

— во-вторых, оригинал находился не на плоскости, а был накатан на стеклянный барабан;

— в-третьих, корректирующие функции строились на теории маскирования, а не на уравнениях Нойгебауера;

— в-четвертых, сепарации экспонировались одновременно, а не последовательно (Bishop, 1951).

Основные узлы PDI-сканера схематично показаны на рис. 29.2. Длинный барабан, прозрачный на одном из концов, медленно вращался вдоль своей оси. Репродуцируемый оригинал был расположен по дуге прозрачного участка барабана, а на непрозрачном были накатаны листы экспонируемых сепараций. Изнутри барабана в его прозрачной части на оригинал фокусировалась световая точка весьма малого диаметра, и после прохода света через оригинальное изображение поток делился на три луча, проходивших, в свою очередь, через красный, зеленый и синий фильтры и падавших после этого на фотоэлементы. По мере вращения барабана и его движения вдоль своей оси, световая точка нарезала плотную спираль, покрывавшую в итоге всю поверхность оригинала.

Три фотоэлемента выдавали электрические сигналы, пропорциональные коэффи-

---

[1] Напомним, что автор приводит цифры, получаемые путем *теле*денситометрии, т.е. измерения, выполняемого с учетом паразитной просмотровой подсветки (что не находит применения в полиграфическом производстве, но имеет высокую научную ценность). — *Прим. пер.*

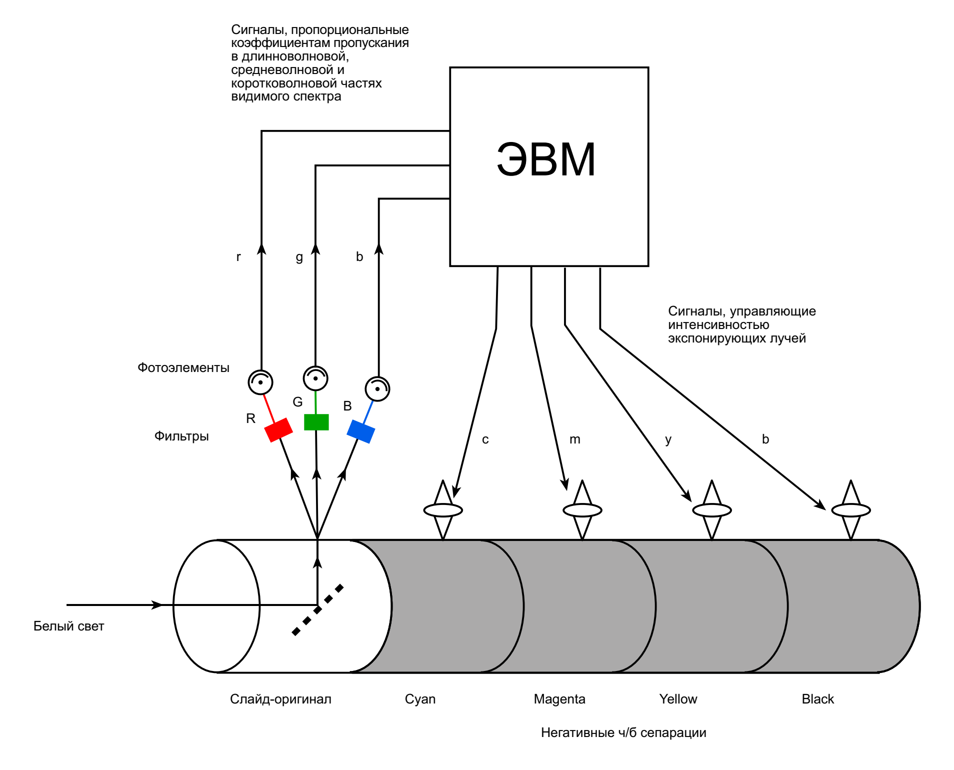


Рис. 29.2 Общая схема PDI-сканера, позволявшего получать полностью откорректированные сепарации со слайд-оригинала, накатанного на прозрачный барабан.

циентам пропускания слайда за красным, зеленым и синим фильтрами. Путем электронной обработки сигналы эти преобразовывались в четыре взаимозависимых сигнала, которые, модулируя интенсивности четырех световых потоков, сфокусированных на четырех листовых фотопленках, управляли экспозицией этих фотопленок по каждой точке их поверхности. В результате на выходе получались полностью откорректированные сепарированные негативы, с которых в дальнейшем классическим путем изготавливались печатные формы.

Обычные цифры линиатур сканирования составляли 250, 500 или 1000 lpi (lines per inch — линий на дюйм) — 10, 20 и 40 lpm (lines per mm — линий на мм), то есть аппарат мог работать на трех возможных уровнях пространственного разрешения.

Коль скоро PDI-сканер работал только с прозрачными оригиналами, то в тех случаях, когда в роли оригинала выступал отражающий отпечаток, с него предварительно изготавливался вторичный слайд-оригинал (см. раздел 27.4), максимальный размер которого составлял 28×36 см.

Размер финальной репродукции был равным размеру сепараций, но, благодаря тому что последние не растрировались, копию удавалось увеличить в 1.5 раза при разрешении сканирования в 250 lpi, в 3 раза при разрешении в 500 lpi, и в 6 раз при 1000 lpi.

29.4 ПРОЧИЕ БАРАБАННЫЕ СКАНЕРЫ

На принципах, описанных в предыдущем разделе, основывалась работа сканера *Scan-a-color* компании Fairchild (Sigler, 1964), однако наряду с прозрачными аппарат работал и с отражающими оригиналами.

Плюс к тому были разработаны менее сложные и менее габаритные устройства, которые, правда, позволяли изготавливать сепарации лишь последовательно, а не одновременно, но оказались уже настолько дешевыми, что могли закупаться отдельными типографиями. К таковым относятся *Diascan* компании Crosfield, оригинальные модели *Chromagraph* компании Hell, а также *Linoscan* компании Linotype (Nash, 1965). Аппараты выдавали полностью откорректированные сепарации слайд-оригиналов, монтировавшихся на барабане.

Отметим, что недостатком барабанных сканеров по сей день является то, что им подходят только гибкие оригиналы, однако же бóльшую часть твердых можно без каких-либо противопоказаний предварительно скопировать на слайд. Сие даже удобно, поскольку на стадии копирования можно выполнять увеличение или уменьшение пространственного размера исходника, смонтировать на один барабан несколько изображений и получить на выходе сепарации *верстки* того или иного графического проекта (см. раздел 27.2). Наконец, отметим, что некоторые погрешности, возникающие на этапе репродуцирования оригинала на слайд, при сканировании легко компенсировать электронным путем.

29.5 ПРОЧИЕ ПЛАНШЕТНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СКАНЕРЫ

Планшетно-механические сканеры, в частности такие, как аппарат Гарди — Вурцбурга (см. раздел 29.2), не ограничивались сканированием одних лишь гибких оригиналов и посему обрели достаточную популярность. В частности, компания Hell сконструировала аппарат Colorgraph (Allen, 1958 a), выдававший одновременно четыре полностью откорректированных сепарации. В зависимости от конкретной модели сканера в качестве оригиналов выступали либо цветные слайды, либо их черно-белые сепарации, либо же отражающие отпечатки.

Модели, использующие в качестве оригиналов ч/б-сепарации, требовали монтажа на возвратной каретке семи черно-белых пленок: трех сепарированных (оригинальных) и четырех неэкспонированных. Каретка проходила под тремя лучами, экспонировавшими фотоэлементы, и четырьмя потоками, экспонировавшими будущие сепарации.

Один из хелловских сканеров, выпускавшийся под маркой *Vario-Klischograph* (Hell, 1954 и 1957) сконструировали специально для гравировки пластин высокой печати: выходной сигнал корректирующей схемы управлял в данном случае не интенсивностью экспонирующего луча, а его диаметром (последний мог меняться до 1000 раз в секунду), благодаря чему на выходе получались растрированные печатные формы. Вместе с тем, используя этот же узел сканера с целью селективного удаления защитного слоя с подложки слайд-пленки, получали полутоновые (растрированные) сепарации, пригодные для изготовления офсетных форм.

В качестве оригиналов могли выступать как слайды, так и отражающие отпечатки, а их пространственное масштабирование осуществлялось за счет специального пантографа.

29.6 ОПТИЧЕСКИЕ СКАНЕРЫ

Одним из недостатков аппаратов, описанных в предыдущих разделах, являлось то, что для обеспечения адекватного разрешения при конверсии изображения в набор электрических сигналов требовалась очень высокая частота строк и очень высокая

прецизионность механики. Поэтому были сконструированы сканеры, в которых сепарации получались традиционным оптическим путем, а через электронные схемы шел лишь корректирующий сигнал. Одним из таких устройств являлся *Autoscan* компании Hunter-Penrose (Kilminster, 1956): корректирующий сигнал в этом аппарате влиял на интенсивность луча, сканирующего оригинальное изображение.

Вторым представителем семейства оптических сканеров был *Scanatron* компании Crosfield (Allen, 1958 a и 1958 b), в котором откорректированные сепарации производились путем сканирующей печати через некорректированные контонные сепарации.

Еще одна модель оптического сканера — *Color-Separator* — выпускалась компанией Log-Etronic и была аналогична Scanatron, но при этом печатала сепарации последовательно и через цветной слайд, а не через его сепарации (Craig и Street, 1960).

Однако все сказанное в данном разделе представляет лишь общеобразовательную ценность, поскольку все современные сканеры полностью конвертируют изображение в набор электрических сигналов.

29.7 МАСШТАБИРУЮЩИЕ СКАНЕРЫ

Первые модели барабанных сканеров давали сепарации, пространственный размер которых был тем же, что и у оригинального изображения. Возможность увеличения слайд-оригиналов (в частности, среднего и 35-мм форматов) появилась позднее.

Одной из версий сканера, позволявшего ощутимо увеличивать и уменьшать изображение на сепарациях, являлся аппарат серии *Magnascan* компании Crosfield (Wilby и Pugsley, 1970), а также ряд моделей линейки хелловских *Chromagraph*, линотайповских *Linoscan* и *Direct Scanagraph* компании Dainippon (см. рис. 18.8).

Поскольку пространственный размер оригинальных слайдов был, как правило, много меньше, чем размер их изображения на сепарациях, в системе Magnascan диаметр выходного барабана (т.е. барабана сепараций) был вдвое больше, чем диаметр барабана входного (т.е. барабана слайд-оригиналов). Если шаг резьбы ходового винта выходного (большого) барабана вдвое превышал таковой у барабана входного (малого), то коэффициент увеличения изображения был равен 2.

Используя два ходовых винта на разных скоростях вращения, добивались большего либо меньшего 2 коэффициента увеличения по направлению оси барабана. Для регулировки увеличения в поперечном направлении сигналы, полученные от изображения, сохранялись в оперативной памяти, а затем считывались с такой скоростью, что репродукция либо растягивалась, либо сжималась. Сигналы хранились в цифровой форме с разрядностью кодирования 8 бит (т.е. 256 уровней сигнала), но в первой версии Magnascan разрядность кодирования составляла 7 бит (128 уровней). Данные о позиции сигнала по строкам изображения также хранились в цифровом виде (за счет дискретизации аналогового сигнала, поступающего от той или иной точки оригинала). Операции сохранения и считывания выполнялись одновременно, поэтому процесс сканирования шел непрерывно.

Скорость сканирования у Magnascan была как минимум той же, что и у обыкновенных сканеров, но когда требовалось масштабирование, время работы увеличивалось до 20 крат.

Включение в конструкцию сканера модуля увеличения, а в некоторых случаях и нескольких комплектов экспонирующих головок, позволяло некоторым моделям Magnascan выдавать одновременно две, а порой и четыре сепарации (но, разумеется,

тогда, когда формат изображения на сепарациях был соответственно вдвое или вчетверо меньше размера выходного барабана).

В одном из линотайповских аппаратов слайд-барабан вращался в три раза быстрее барабана сепараций, а трихроматические сигналы считывались со слайда последовательно, из-за чего в качестве светочувствительного элемента мог использоваться только один фотоэлектронный умножитель.

Некоторые сканеры (такие, как Magnascan 530 и 540, а также Direct Scanagraph 701 и 708) имели в своей конструкции систему электронной синхронизации между входным и выходным барабанами, позволявшую делить входные и выходные сигналы так, что считывание данных с оригинала происходило в освещенном помещении, а экспонирование сепараций — в затемненном.

В некоторых моделях, к примеру в Magnascan 690, один входной модуль управлял блоком выходных модулей, что позволяло одновременно изготавливать несколько больших сепараций.

29.8 КОНЕЧНЫЙ ПРОДУКТ

Результатом работы сканеров могли являться сепарации непрерывного тона (контонные сепарации) либо же сепарации растрированные, получаемые как через контактные растры, так и путем электронного воспроизведения растровых точек. Когда сканер выполнял растрирование, последующее изготовление печатных форм существенно упрощалось. Однако если требовались комплекты печатных форм разной степени увеличения, то изготавливались только контонные сепарации. Плюс к тому контонные сепарации непрерывного тона требовались производству валов глубокой печати.

Источниками света, применявшимися для экспонирования сепараций, служили ксеноновые лампы высокого давления, галогенные лампы накаливания и лазеры. Модуляция интенсивности светового потока обеспечивалась изменением напряжения за счет электрооптических либо акустооптических устройств.

При изготовлении растрированных сепараций, когда экспонирование шло через контактные растры (также смонтированные на экспонирующем барабане), требовалась очень высокая интенсивность экспонирующего светового потока, что достигалось за счет ксеноновых дуг или лазеров.

Электронная отрисовка растровых элементов осуществлялась за счет специального управления интенсивностью экспонирующих световых точек: в одной из систем шесть оптоволоконных кабелей, расположенных в один ряд, образовывали на экспонируемой пленке шесть микроточек, формирующих одну растровую (полутоновую) точку. Позднее появились системы с матрицей микроточек 12×12, что позволяло задавать растровой (полутоновой) точке разные формы: квадратную, прямоугольную, круглую, овальную, и пр.

Отметим также, что поворот растровой сетки (см. раздел 26.6) реализовывался за счет специальных математических алгоритмов (Holladay, 1980).

29.9 ЭЛЕКТРОННАЯ РЕТУШЬ

У многих сканеров сигнал, полученный от оригинала, полностью оцифровывался и, следовательно, мог храниться на жестком диске компьютера в виде файла данных. Сие давало возможность манипулирования сигналами по схеме, аналогичной той, что используется в цветном телевидении (см. гл. 25).

В одной из систем для визуализации электронного изображения оригинала применялся высококачественный цветной монитор, и оператор, выделив курсором интересующую его область, обрабатывал ее отдельно от остальной части изображения по алгоритмам видеографики (см. раздел 25.6) или цветовой электронной рирпроекции (см. раздел 25.3). Отдельные области изображения можно было полностью «перекрасить», к примеру для того, чтобы получить из оригинального снимка автомобиля набор изображений этого же автомобиля разной окраски; то есть с помощью электронной ретуши можно было поместить в торговый каталог товары одной номинации, но очень широкого диапазона окрасок, подчас таких, каких даже нет в действительном предложении (см. рис. 29.3).

Замечательным свойством электронной ретуши и сегодня является возможность выделить интересующую область изображения и обработать ее в зависимости от той или иной задачи, к примеру: удалить грязь, царапины и прочие дефекты, дав компьютеру команду сделать все пикселы цифрового изображения в этой области одинаковыми (в результате чего пикселам всех артефактов присваиваются значения окружающих элементов). Развитые инструменты ретуши позволяют скопировать соседние элементы изображения на пораженное место и тем самым сохранить его фактуру в данном участке, не дав образоваться паразитным неестественно выглядящим «плашкам».

Смешивая разными путями оригинальную визуальную информацию с информацией, полученной либо от машинных команд, либо из других источников изображения, можно добиваться самых разнообразных эффектов (см. рис. 29.3, 29.5 и 29.7), к примеру: деликатно повысить визуальную резкость изображения, усилить или изменить окраску отдельных элементов, добавить текстовые заголовки и пр.

Разумеется, цифровая технология позволяет с легкостью выполнять тоновую и хроматическую коррекции отдельных областей изображения, равно как и его отдельных элементов.

29.10 ЭЛЕКТРОННАЯ ВЕРСТКА

В издательском деле практически всегда возникала (и возникает) необходимость располагать репродукции разных оригиналов на одном печатном листе, т.е. выполнять *верстку* страниц издания и их спуск на печатные листы. Благодаря сепарирующим сканерам сие стало легко осуществимо (Pugsley, 1981): традиционным инструментом верстки от века являлся т.н. *координатно-разметочный стол*, на котором по некоей модульной сетке из тонких линий отмечались пространственные позиции иллюстраций; с появлением электронных сканеров сетку разметочного стола стали переносить в компьютер, а затем «сажать» по этой сетке отсканированные изображения, векторные обводки и прочие элементы. Когда печатный лист был полностью сформирован, то для экспозиции будущих сепараций пакет соответствующих цифровых данных отправлялся на выход сканера.

29.11 ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

В алгоритмах фотографического маскирования уровень последнего обычно задавался аналитическим путем, то есть путем решения определенного набора уравнений. При этом результат не был равновелико эффективным по всем красочным комбинациям, но плавно дрейфовал в рамках цветового охвата репродукции. Сканеры, благодаря логическим схемам, позволили подбирать для разных красочных комбинаций инди-

Рис. 29.3 В середине XX века полиграфические сканеры дали возможность манипулировать изображением в весьма широких переделах (см. раздел 29.9). В данном примере оригинальное изображение цветущего пиона (1) было изменено следующим образом:
2. Фон удален, размер уменьшен и добавлены несколько лепестков, «покрашенных» голубым, пурпурным и желтым.
3. Белые лепестки заменены на зеленые с желтыми включениями.
4. В средних тонах белые лепестки «перекрашены» в желтые, в тенях — в красные. Фон высветлен и в светах «перекрашен» в красный.
5. Изображение разбито на квадратики, однако при большом просмотровом расстоянии оно воспринимается как оригинал.
6. Белые лепестки «перекрашены» в голубые.
7. Белые лепестки «перекрашены» в желтые, а горизонтальным строкам изображения придана пилообразная форма.
8. Все элементы пиона «перекрашены» в зависимости от их оптической плотности.
9. То же, что 8, но элементы фона «перекрашены» в зависимости от их оптической плотности и расстояния от низа изображения.
10. Лепестки «перекрашены» в голубой, пурпурный и желтый в зависимости от их углового положения.
Обработка выполнена Дэвидом Мак-Кензи в системе Crosfield Studio.




5
6
7
8
9
10

видуальную схему маскирования, причем с весьма деликатным переходом между категориями, к примеру: области изображения, в которых доминировала yellow-сепарация (область желтых стимулов) маскировались по одному алгоритму, а области, где доминировали сепарации cyan и magenta (область синих стимулов) — по другому. При этом переход через серую шкалу был весьма плавным.

Проще говоря, возможность раздельного маскирования, предоставленная сканерами, дала колоссальную степень свободы в управлении характеристиками цветовой репродукции.

29.12 НЕРЕЗКАЯ МАСКА

Проработку мелких деталей изображения путем нерезкого маскирования (см. раздел 15.3) было проще всего реализовать с помощью оптического сканера (см. раздел 29.6), диаметр сканирующей точки которого выбирался чуть бо́льшим, чем самая мелкая деталь в изображении: эффекта нерезкой маски по каждой строке (т.е. по горизонтальному направлению) добивались с помощью специальной регулировки частотных характеристик электронных схем аппарата, а в вертикальном направлении эффект нерезкого маскирования достигался только в том случае, если сканер сохранял в оперативной памяти данные по каждой точке текущей строки.

Вторым вариантом нерезкого маскирования являлось двойное сканирование, выполнявшееся вначале световым пучком малого диаметра (в результате чего при данном разрешении собиралась полная информация об изображении), а затем пучком втрое большего диаметра, дававшего собственно эффект нерезкой маски (Hall и Yule, 1956; Nash, 1965) (см рис. 29.6).

Стоит сказать, что применялись оба описанных метода, однако второй, в силу своей меньшей стоимости, обрел бо́льшую популярность.

Наконец, отметим, что в некоторых сканерах использовались цифровые электронные схемы, которые специальным образом программировались на выполнение нерезкого маскирования (благодаря чему, к примеру, удавалось понизить паразитную зернистость изображения в тенях).

29.13 РАЗДЕЛЬНОЕ МАСКИРОВАНИЕ

Если наряду с традиционным выполнялось сканирование световой точкой много большего диаметра, то порой удавалось несколько притемнить света изображения и высветлить тени (Hall и Yule, 1964): сие было весьма кстати в контексте зональных *затенения* и *пропечатки* (выполнявшихся при традиционной фотооптической печати вручную), то есть локального изменения контрастности отдельных участков изображения, соответствующих разноосвещенным участкам сцены (Cox, 1959).

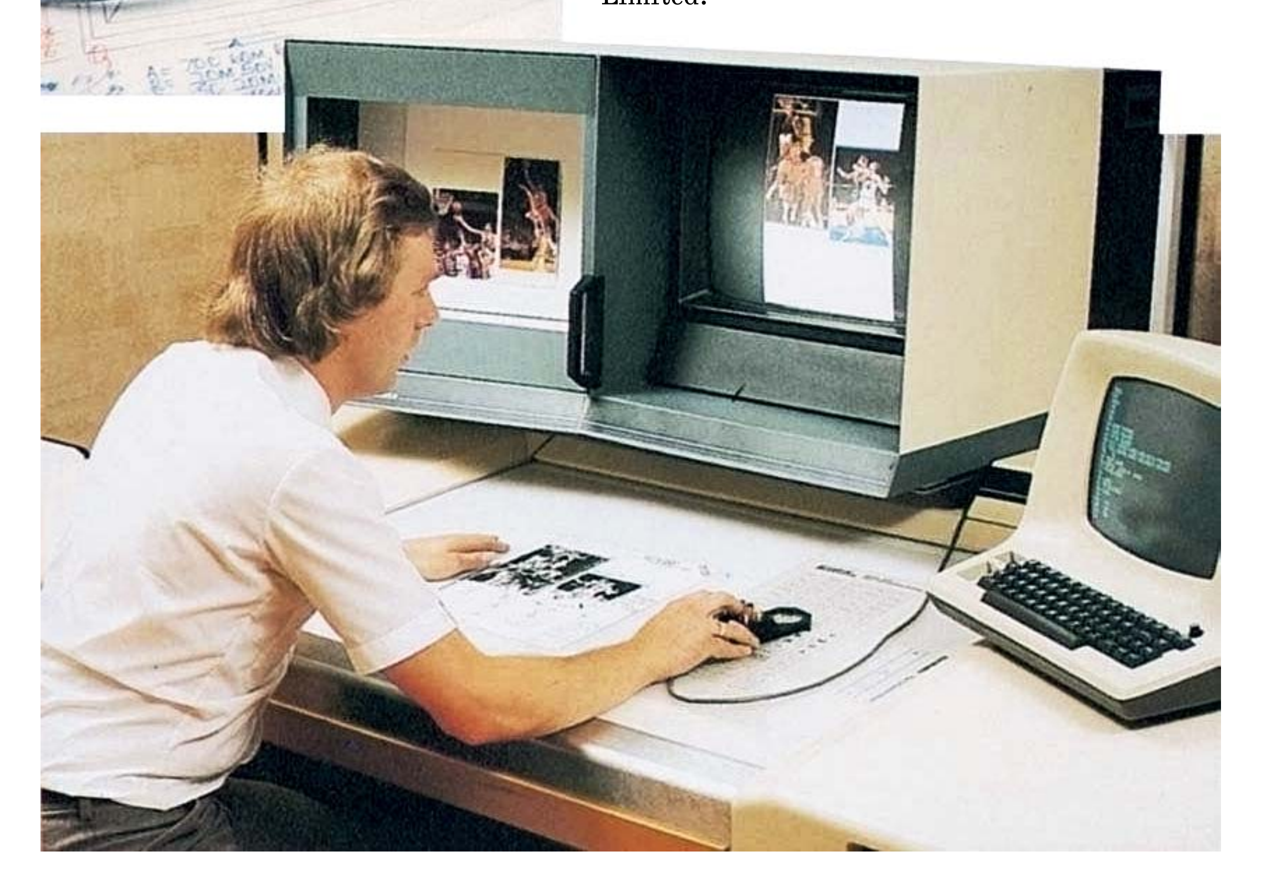
29.14 GCR

Сканеры дали весьма интересную возможность изготавливать сепарации так, что понижение светлоты хроматических стимулов, воспроизводимых двумя из трех CMY-колорантов в том или ином участке изображения, достигалось не за счет добавки третьей краски (и неизбежного изменения соотношения между всеми тремя), но за счет добавки черной (хроматически нейтральной) краски. Метод получил название





Рис. 29.4 Начало 80-х годов XX века.
Вверху: программирование барабанного сканера перед началом работы. Выдаваемые им сигналы уже можно было сохранять в цифровой форме.
В центре: управляющий курсор, расположенный на монтажном столе. Мог использоваться для идентификации той или иной области изображения за счет специальной проволочной сетки. Положение курсора отображалось на экране CRT-дисплея. Перемещая курсор, можно было выделить ту или иную область изображения и обработать ее по своему усмотрению (см. раздел 29.9). Обработанные изображения сохранялись для последующей верстки и вывода негативных сепараций.
Внизу: оператор сканирования сравнивает отражающие оригиналы, расположенные в просмотровом коробе, с экранным изображением этих оригиналов на экране CRT-дисплея, полученным из сигналов сканера.
С любезного разрешения Crosfield Electronics Limited.



GCR — Grey Component Replacement, что в подстрочном переводе звучит как «замена серого компонента». Когда тот же принцип применялся к теневым нейтральным и околонейтральным элементам изображения, то его называли *UCR — Under Color Removal* (удаление части CMY-составляющей и ее замена на черную краску), в результате хроматически нейтральные и околонейтральные теневые области изображения воспроизводились не столько за счет смеси трех колорантов, сколько за счет черной краски (благодаря чему баланс серой шкалы стал намного более устойчивым).

Более того, управление светлотой элементов изображения тоже стало осуществляться в основном за счет черной краски, а поскольку визуальная резкость и разрешающая способность изображения зависят сугубо от яркостных отличий между элементами этого изображения и большинство яркостных отличий в этом случае базировалось на модуляциях лишь в красочном black-изображении, то имел место некоторый рост резкости и разрешения. Любопытно отметить, что ровно из тех же соображений в цветном телевидении яркостный сигнал передается отдельно и с высоким разрешением (см. раздел 19.7).

Стоит сказать также, что GCR-принцип позволил повысить скорость высыхания красок в процессе печати, а также снизить их общий расход (со всеми вытекающими экономическими выгодами).

Однако же стоит отметить, что педалирование GCR ведет к снижению максимальных оптических плотностей в черных участках изображения (которые всегда окажутся темнее, если воспроизведены четырьмя красками, а не одной), поэтому показана лишь частичная замена триады на черную краску в этих участках (см. рис. 29.6).

29.15 UCC

Путем селективного маскирования электронные узлы сканеров позволили повышать чистоту цвета некоторых стимулов репродукции (что при традиционном изготовлении сепараций часто опускали). Одним из методов явился т.н. *UCC-метод — Under Color Correction* (Smith, 1954): во влажной печати последующее красочное изображение ложилось на предыдущее до того, как краска успевала высохнуть, и мокрая краска часто препятствовала эффективному переносу следующей. В итоге результирующая оптическая плотность паттерна растровых точек оказывалась зависимой от того, на какую поверхность легла та или иная триадная точка — на сухую бумагу или на влажный слой предыдущей краски. Сей эффект, получивший название *трэппинга* (см. раздел 28.15), зависел в основном от последовательности наложения красок, но если последовательность эта была заранее известна, то трэппинг мог учитываться путем электронного маскирования.

29.16 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

В сепарирующих сканерах на вход компьютера обычно подавалось постоянное напряжение, амплитуда которого была пропорциональна коэффициентам пропускания (или отражения) оригинала по длинным, средним и коротким волнам видимого спектра. Перед началом работы обычно выставлялся уровень сигнала, соответствовавший белой точке оригинала (иногда — черной точке), а по выполнении сканирования сигналы пропускались через схему, конвертирующую их из линейного представления в примерно логарифмическое (благодаря чему сигналы эти становились примерно пропорциональны оптическим плотностям оригинала, а не коэффициентам его про-





Рис. 29.5 Усиление краевых контрастов — весьма эффективный механизм повышения визуальной резкости изображений, широко распространенный в фотографии, телевидении и полиграфии. *Вверху*: результат сканирования без усиления краевых контрастов. *Внизу*: сканирование с усилением краевых контрастов; отчетливо виден рост визуальной резкости изображения.









Рис. 29.6 Чтобы получить результат, показанный в правой колонке, во всех трех случаях наряду с триадным комплектом использовалось красочное black-изображение. В верхнем ряду: метод CGR (см. раздел 29.14) не применялся; в среднем ряду: частичное применение GCR; в нижнем: максимально допустимое.

Преимуществами GCR метода являются: бо́льшая визуальная резкость мелких деталей изображения, высокая хроматическая стабильность серой шкалы, быстрое высыхание красок и экономия их расхода. Полная замена CMY-колорантов на черную краску при воспроизведении серых элементов может снизить максимальные оптические плотности изображения и, следовательно, понизить его общий контраст (поэтому замена на черный всегда должна быть долевой).

пускания или отражения). При этом обычно возникала необходимость в определенной компрессии диапазона данных, что делало сигналы сканера более управляемыми и адекватными финальному оттиску (диапазон оптических плотностей которого априори невелик).

Маскирование выполнялось тремя схемами по трем похожим уравнениям, которые добавляли или вычитали логарифмированные значения сигналов. Сканер мог также выполнять операции, эквивалентные двухэтапному маскированию и/или применению нелинейных масок (см. раздел 28.7). Плюс к тому логические схемы могли переключать компьютер из одного режима в другой по мере изменения колориметрического характера элементов оригинала.

Частичная или полная реализация принципов GCR и UCC (см. разделы 29.14 и 29.15), а также расчет значений по черной сепарации выполнялись на следующем этапе работы сканера.

На завершающей стадии процесса четыре сигнала пропускались через специальные схемы гамма-предыскажения, обеспечивавшие тоновую равномерность финального логарифмического сигнала. Сие порой требовалось для того, чтобы коэффициент контрастности (гамма) светов и теней репродукции был достаточно высоким (что, в свою очередь, обеспечивало хорошую проработку деталей в этих участках диапазона), а в средних тонах — низким. Однако прежде чем пойти на вход модуля, управлявшего интенсивностью экспонирующего светового потока (или потоков), либо на иное устройство, модулировавшее количество печатной краски, сигналы пропускались через схему антилогарифмирования.

В некоторых сканерах описанные выше процессы осуществлялись в цифровой форме (см. также гл. 32).

Стоит также сказать, что гибкая схема управления сигналами позволяла добиваться высокой вариабельности репродукционных характеристик системы (в частности, таких, как форма тон-передающих кривых), вариабельности параметров хранения данных в памяти, параметров считывания этих данных и т.д., к примеру: можно было моментально переключаться от спецификации одного комплекта триадных красок к спецификации другого, а также использовать т.н. *таблицы соответствий* (LUTs).

29.17 ЭКРАННАЯ ЦВЕТОПРОБА

С целью контроля всего процесса сканирования, а также качества изображения на разных этапах его обработки, активно использовались и используются цветные мониторы, позволяющие реализовать т.н. *экранную цветопробу* (*экранный пруфинг, софт-пруфинг*), которая обеспечивает, в частности, допечатный контроль сепараций (см. раздел 27.11.3). Плюс к тому, с целью упрощения коррекции печатного листа в целом, экранная цветопроба позволяет приводить электронную копию оригинала (т.е. результат его сканирования) к некоему стандартному состоянию. Некоторые системы даже позволяют подключать к себе специальную камеру, фиксирующую с экрана монитора все изменения, происходящие с изображением (что весьма кстати, когда результат препресс-работы хотят оценить в разных отделах предприятия до отправки сепарации на вывод).

Наконец, отметим, что комбинация фотографических и электронных методов — это серьезнейший этап в развитии технологий цветовоспроизведения.

29.18 СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СКАНЕРОВ

29.18.1 Аппаратно-независимое сканирование

Легко догадаться, что колориметрически точные сепарирующие сканеры должны были отвечать требованию Лютера — Айвса, то есть их спектральные чувствительности должны были представлять собой набор трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (или их линейную комбинацию), поскольку только в этом случае стимулы оригинала, метамерные для зрения, оказывались метамерными и для сканера (и наоборот). Сие избавляло от необходимости индивидуального подхода к сканированию, в частности, живописные полотна, фотопленки и фотобумаги любой марки могли сканироваться по одним и тем же алгоритмам (не считая учета эффектов отличий в цветовых охватах печатных процессов и характере окружения изображений при их просмотре). Более того, сканеры, в программное обеспечение которых были заложены разные наборы линейных комбинаций трихроматических кривых Стандартного наблюдателя, могли путем простого 3×3-матрицирования легко конвертировать значения, полученные на одном сканере в значения другого, реализуя тем самым принцип т.н. *аппаратной независимости* (см. раздел 33.13).

Однако у описанного подхода имелся ряд недостатков:

— во-первых, трихроматические кривые зрительной системы спектрально широкополосны, в результате чего для получения соответствующих трихроматических сигналов, необходимых как для экранной визуализации изображения, так и для расчета диаметров растровых точек трихроматических сепараций, матрица пересчета должна была иметь весьма крупные недиагональные коэффициенты, что уменьшало соотношение «полезный сигнал/шум». В итоге приходилось понижать скорость сканирования и, соответственно, производительность аппарата;

— во-вторых, идеально точная подгонка трихроматических кривых Стандартного наблюдателя фильтрами и фотоэлементами в целом неосуществима, что вносило определенные погрешности в выходные сигналы аппарата;

— в третьих, сигналы сканера находились в непосредственной зависимости от спектрального состава света лампы, что влекло за собой необходимость выбора специфического источника подсветки (см. также раздел 32.6).

29.18.2 Аппаратно-зависимое сканирование

Альтернативным и весьма распространенным подходом к сканированию являлся подбор красного, зеленого и синего фильтров, аналогичных тем, что использовались при измерении интегральных оптических плотностей (см. раздел 14.16). Когда оригинал строился на тех же CMY-колорантах, что и его репродукция (*дублицирование* — частный случай цветовоспроизведения), такой тип сканирования давал колориметрически точную копию (см. раздел 15.7). Однако же ситуация дублицирования возникала редко, и оригиналы, поступавшие на сканирование, чаще всего выполнялись на фотопленках и фотобумагах разных марок (соответственно разными наборами CMY-колорантов). Сие не приводило к существенным погрешностям, но требовало отработки индивидуальных алгоритмов сканирования, учитывающих тип оригинальной фотопленки. То есть имела место ситуация *аппаратно-зависимого цветовоспроизведения.*

Однако в широком употреблении всегда находились (и находятся) фотопленки не более чем шести производителей, поэтому программные алгоритмы сканеров вполне



Рис. 29.7 Данный коллаж является собой пример манипуляций, выполняемых с помощью систем электронной верстки (см. раздел 29.9). Изображение девушки с барабаном сканера в руках воспроизведено с разными оттенками ее лица и костюма и на раз-



ных фонах. Прочие «артефакты» созданы компьютером. Дизайнер: Терри Колеман. Система: Crosfield Studio (пр-во Crosfield Electronics Limited).

могли учесть особенности того или иного брэнда, что обеспечивало устойчиво высокое качество цветовоспроизведения. Фотобумаги же всех известных фирм по составу своих красителей в целом были (и остаются) одинаковыми.

Сканирование через красный, зеленый и синий фильтры имело следующие преимущества:

— во-первых, нужные фильтры были легкодоступны, но, правда, только в Status T. Сие означает, что полосы их пропускания были шире (рис. 28.10), чем у тех фильтров, что применялись для измерений интегральных оптических плотностей (Status A). Последний тезис проиллюстрирует рис. 14.7, на котором спектральные произведения Status T сравниваются с таковыми в Status A. Отметим, однако, что широкие полосы Status T, чуть лучше аппроксимирующие трихроматические кривые Стандартного наблюдателя, позволяли несколько уменьшить отличия между разными марками фотоматериалов;

— во-вторых, расчет результирующих трихроматических сигналов из нативных сигналов сканера либо вообще не требовал матрицирования, либо же ему было достаточно крайне малых недиагональных коэффициентов матрицы, в результате чего отношение «полезный сигнал/шум» не имело заметных потерь;

— в-третьих, не требовалось спецификации осветителя, и, когда репродукция строилась на тех же колорантах, что и оригинал (частный случай цветовоспроизведения), колориметрический уровень достигался при любом спектральном составе освещения (то есть, даже в тех случаях, когда оригинал и репродукция сравнивались при разных источниках света, распада метамерного равенства между ними не возникало).

29.18.3 «Спектральное» сканирование

Стоит сказать, что наряду с традиционным трихроматическим предпринимались попытки сканирования при более чем трех вариантах спектральной чувствительности сенсоров: сравнительно недавно было показано, что применение шести специально подобранных чувствительностей может дать пропорции шести базовых функций, сумма которых, в свою очередь, обеспечивает максимальное приближение к спектральным свойствам большинства оригиналов; однако оказалось, что даже четыре функции дают ощутимо лучший результат, чем три классических (Roetling, 1993).

Несмотря на то что в данном случае сканер выдавал более трех сигналов на каждый пиксел изображения, постобработка этих сигналов редуцировала их до трех, необходимых экранному отображению и расчету диаметров растровых точек CMYK-сепараций. Отметим, что это была работа практически со спектральными данными, которая реализовывала принципы аппаратной независимости цветовоспроизведения и его независимости от состава освещения.

29.19 ТЕСТ-КАРТЫ

Практика хранения изображений в цифровой электронной форме привела к стремительному росту интереса к вопросам стандартизации процессов оцифровки и печати. Стандартизация эта сегодня строится на применении:

— т.н. *тест-карт* входной характеризации процессов сканирования;

— тест-карт характеризации процессов четырехкрасочной полиграфической печати;

— стандартах хранения информации о трихроматических (RGB, XYZ), красочных (CMYK, Hexachrome и т.д.) или цветовых (CIELAB) характеристиках изображения;

— пресс-тестах характеризации цветопробных систем;
— прикладной колориметрии.

29.19.1 Тест-карты характеризации сканирования

Коль скоро большинство сканеров все-таки не отвечает требованию Лютера — Айвса, то есть их спектральные чувствительности не являют собой набора трихроматических кривых Стандартного наблюдателя (или их линейной комбинации) (см. раздел 29.18), то результаты сканирования двух визуально идентичных оригиналов, выполненных на разных материалах, могут оказаться различными, и наоборот: визуально отличные друг от друга изображения одной и той же сцены при сканировании могут оказаться совершенно одинаковыми. Сей эффект различен у разных аппаратов.

Однако же большинство изображений, предназначенных к сканированию, построены на CMY-колорантах, и колоранты эти в подавляющем большинстве случаев принадлежат всего лишь пяти производителям: Kodak, Fuji, AGFA, Konica и Polaroid. В свое время перечисленные компании разработали общий формат отражающих и прозрачных тест-карт характеризации сканеров, получивший название «Q60». В основу формата положена слегка переработанная система Film Reproduction Guide компании Kodak. Отметим также, что все перечисленные фирмы выпускают Q60-карты на своих фотоматериалах.

По международной классификации Q60-формат называется «IT8.7/1 Graphic Technology Color Transmission (or Reflection) Input Target for Scanner Calibration», что значит «Входная цветовая полиграфическая мишень IT8.7/1 на пропускание (или отражение), предназначенная для калибровки сканеров». Мишень эта (тест-карта) несет в себе шкалы одно-, двух- и трехкрасочных комбинаций, а также нейтральную шкалу. Плюс к тому в тест-карте имеются окрашенные патчи двенадцати цветовых тонов на трех уровнях светлоты и при четырех степенях насыщенности.

Спецификация всех образцов мишени дается в системе CIELAB (см. раздел 8.8). Три равноотстоящих друг от друга контура насыщенности задают фигуру общего хроматического охвата всех известных фотоматериалов, а четвертый контур — максимум хроматического охвата данного фотоматериала.

Прозрачные тест-карты обычно выпускаются в размер 4×5" либо 24×36 мм; отражающие — 4×5".

RGB-значения сканера, полученные при сканировании тест-карты, с помощью специализированных программ ставятся в соответствие перцепционным координатам (CIELAB-значениям). Результат такого сопоставления фиксируется в виде специальной трехмерной таблицы — таблицы цветовых соответствий (CLUT — Color Look Up Table).

29.19.2 Тест-карты характеризации печати

Зависимость колориметрических и тем паче перцепционных характеристик цветового стимула, образующегося в результате освещения запечатанной поверхности, от CMYK-значений, содержащихся в файле цифрового изображения (или площадей заполнения на сепарациях), не поддается простому расчету. Поэтому на практике применяются разного рода аналитические и табличные (CLUT) модели, описывающие характер печатных процессов. Для создания таких моделей (или таблиц) необходим набор CMYK-значений, подобранных по определенной зависимости.

Комплект CMYK-значений, именуемый «IT8.7/3 Graphic Technology Prepress

Input Data for Characterization of 4-colour Process Printing» (что в подстрочном переводе означает «Набор IT8.7/3 полиграфических допечатных входных данных[1] характеризации четырехкрасочного печатного процесса»), состоит из двух частей: первая часть (182 CMYK-значения) ориентирована на построение аналитической модели перехода от CMYK значений к значениям CIELAB и обратно; вторая часть (746 CMYK-значений) — на построение LUT, т.е. неаналитической, табличной модели такого перехода, предполагающей разного рода интерполяции.

29.19.3 Цифровые эталонные изображения

Несмотря на то что тест-карты исключительно важны в колориметрической оценке печатного процесса, визуальный его контроль — важнее. Осуществлять его удобнее по реалистичным изображениям, для чего в свое время был разработан набор цифровых стандартных изображений, объединенных общим названием SCID — Standard Color Image Data. Набор состоит из восьми естественных сюжетов и десяти искусственных образцов.

29.19.4 Спецификация цветопробных систем

Описанные выше наборы данных можно использовать в том числе и для спецификации цветопробных систем. Одна из распространенных цветопробных спецификаций называется SWOP — Specifications for Web Offset Publications и представляет собой таблицу CIELAB-значений, соответствующих набору CMYK-величин IT8.7/3.

29.19.5 Колориметрия

В целях обеспечения устойчивости результатов печати и цветопробных процессов были стандартизированы условия колориметрии описанных выше тест-карт:
— CIE стандартный двухградусный наблюдатель (см. раздел 8.4);
— геометрии освещения и просмотра 0/45 (см. раздел 13.12);
— Стандартный осветитель D_{50} (см. раздел 8.2);
— черная подложка при спектрометрии отражающих образцов.

29.20 НАСТОЛЬНЫЕ СКАНЕРЫ

Появление на рынке бытовых компьютерных систем и недорогих цифровых печатающих устройств привело в итоге к появлению простых и дешевых сканеров (см. также гл. 32), построенных, как правило, на CCD-сенсорах и способных оцифровывать как отражающие, так и прозрачные оригиналы.

В этих аппаратах оригинал с помощью специальной оптической системы проектируется на CCD-линейку и за счет ее плавного смещения (либо же за счет движения оптики или оригинала) прочитывается вся поверхность изображения.

Трихроматические сигналы настольного сканера образуются либо за счет тройного прохода линейки за красным, зеленым и синим фильтрами, либо за счет трех окра-

[1] Напомним, что CMYK-значения файла изображения — это входные данные печатного процесса, тогда как выходными его данными являются колориметрические характеристики цветовых стимулов, воспроизводимых этих процессом. — *Прим. пер.*

шенных световых потоков, либо за счет однократного прохода линейки с последующим делением светового потока, отраженного от оригинала, дихроичными зеркалами, либо же за счет однократного прохода строго параллельных линеек, покрытых соответственно красным, зеленым и синим фильтрами. Последнее — самый распространенный вариант.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Allen, G.S., J. Phot. Sci., 6, 125 (1958a).
Allen, G.S., Penrose Annual, 52, 123 (1958b).
Bishop, N., Penrose Annual, 45, 9 (1951).
Clapper, F.R., and Yule, J.A.C., J. Opt. Soc. Amer., 43, 600 (1953).
Cox, H.W., Penrose Annual, 53, 88 (1959).
Craig, D.R., and Street, J.N., Tech. Assoc. Graphic. Arts, 12, 175 (1960).
Hall, V.C., and Yule, J.A.C., U.S. Patent 2,744,950 (1956).
Hall, V.C., and Yule, J.A.C., U.S. Patent 3,153,698 (1964).
Hardy, A.C., and Wurzburg, F.L., J. Opt. Soc. Amer., 38, 300 (1948).
Haynes, H.E., Penrose Annual, 46, 83 (1952).
Hell, R., Penrose Annual, 48, 101 (1954).
Hell, R., Penrose Annual, 51, 117 (1957).
Holladay, T.M., Proc. S.I.D., 21, No. 2, 185 (1980).
Kilminster, R., Penrose Annual, 50, 111 (1956).
Murray, A., and Morse, R.S., U.S. Patent 2,253,086 (1941).
Nash, C.F., Litho Printer, 8, 33 (August, 1965).
Ohler, A.E., Penrose Annual, 49, 80 (1955).
Pugsley, P.C., I.E.E.E. Transactions and Communications, Com. 29, 1891 (1981).
Roetling, P.G., IS&T and SID's Color Imaging Conference: Transforms & Transportability of Color, page 92,
IS&T, Springfield, Va, USA (1993).
Rydz, J.S., and Marquart, V.L., Tech. Assoc. Graphic Arts, 6, 139 (1954).
Rydz, J.S., and Marquart, V.L., Tech. Assoc. Graphic Arts, 7, 15 (1955).
Sigler, H., Tech. Assoc. Graphic Arts, 16, 192 (1964).
Smith, F.H., Penrose Annual, 48, 131 (1954).
Wilby, W.P.L., and Pugsley, P.C., Printing Technology, 14, 142 (1970).

ЛИТЕРАТУРА

Allen, G.S., J. Phot. Sci., 6, 125 (1958).
Crosfield, J.F., Recollections of Crosfield Electronics 1947–1975, Crosfield, Hemel Hempstead (1991).
Field, G.G., J. Phot. Sci., 34, 33 (1986).
Nash, C.F., Litho Printer, 8, 33 (August, 1965).
Nash, C.F., Litho Printer, 8, 43 (September, 1965).
Yule, J.A.C., Principles of Color Reproduction, Chapter 12, Wiley, New York (1967).

Часть пятая

ЦИФРОВОЕ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ

30 КОДИРОВАНИЕ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

30.1 ВВЕДЕНИЕ

В традиционных системах цветовоспроизведения сигналы, несущие визуальную информацию, представлены в аналоговой форме: в фотографических — количеством cyan-, magenta- и yellow-красителей; в телевизионных — напряжением в трихроматических каналах (либо в яркостном и цветоразностных); в полиграфических — размером растровых CMY-красочных точек. Развитие надежных и более или менее недорогих технологий получения и приложения *цифровых* сигналов (а также управления ими) привело к массовому применению этих технологий в деле цветовоспроизведения, оттеснив далеко на второй план технологии аналоговые.

Если в аналоговых системах уровень сигнала меняется без прерываний, то уровни сигнала цифрового всегда *дискретны* и их количество предопределено заранее. На первый взгляд, последнее суть большой недостаток, однако же, если обеспечено такое количество уровней цифрового сигнала на диапазон, что переход между соседними уровнями ведет к незаметным (т.е., лежащим ниже порога визуального отличия) физическим изменениям в конечном изображении, то дискретность сигнала никак не сказывается на качестве этого изображения. При этом визуальная информация передается с этапа на этап с несоизмеримо большей надежностью. Таким образом, огромное преимущество цифрового представления визуальной информации еще и в том, что информация эта идет по всем этапам цветорепродукционного процесса без каких-либо искажений (чего нельзя сказать об информации, закодированной аналоговым сигналом). Отметим также, что цифровой сигнал достигает своего оптимума сразу над порогом детекции, тогда как достижение оптимума сигналом аналоговым требует значений намного бóльших порогового.

Цифровые сигналы активно используются в закрытых системах телестудий (т.е. до передачи программ в эфир), в качестве дополнительных сигналов широковещательного телевидения, а также телевидения высокой четкости (см. раздел 19.16); в полиграфии сигналы, получаемые со сканеров, чаще всего цифровые и сохраняются в виде файла цифровых данных; в фотографии файл изображения часто получают от цифровых камер и хранят на Photo CD (см. раздел 24.8); компьютеры, как известно, манипулируют числами, и информация об изображении поступает в компьютер тоже в цифровой форме.

Простота манипулирования цифровыми данными, простота их визуализации на экране монитора и разных поверхностях, привели в конце 80-х годов прошлого века к появлению т.н. *настольных издательских систем*, в частности, *настольных печатающих устройств* (см. гл. 33).

Наконец отметим, что цифровые сигналы всегда двоичны: простейший цифровой сигнал имеет лишь два значения (два уровня) — 0 или 1. Сие обозначают как 1 бит

(одна двоичная единица). Два бита информации указывают на пару двух возможных уровней — 2^2. Аналогично 3 бита дают 8 уровней (2^3), 4 бита — 16 уровней (2^4), 5 бит — 32 уровня (2^5), 6 бит — 64 (2^6), 7 бит — 128 (2^7), 8 бит — 256 уровней (2^8) и т.д.

Аналоговые сигналы плавно переходят с уровня на уровень, следовательно, разность между двумя аналоговыми сигналами, поступившими от двух пространственно разделенных точек изображения, может иметь любое значение. Однако же поскольку значения цифровых сигналов строго дискретны, то сигналы эти могут относиться только к пространственно дискретным точкам изображения. То есть, мы говорим, что цифровое изображение *дискретизировано* не только тонально, но и пространственно.

30.2 ТОНАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ

Чтобы сохранить плавность тональных переходов при кодировании изображения в цифровой форме, необходимо обеспечить должное количество уровней сигнала на каждый аппаратный канал (либо RGB-трихроматический, либо яркостный и цветоразностные, либо CMY, либо CMYK). Когда этих уровней недостаточно, то в градиентах становится весьма и весьма заметным их *паразитное оконтуривание* (*паразитное визуальное дробление*). Однако в свое время было показано, что для обеспечения перцепционной равномерности тональных переходов в рамках динамического диапазона системы достаточно всего лишь 90 уровней яркости и, следовательно, 90 уровней дискретизации яркостной информации (6.5 бит).

Цифровые системы чаще всего оперируют 8-ю битами на каждый трихроматический канал, давая в сумме 24 бит, и, следовательно, в целом $2^{24} = 16777216$ вариантов трихроматического сигнала. Вместе с тем вопрос о том, каково количество стимулов, которые способно распознать зрение человека при фотопической адаптации, по сей день остается открытым. По ряду данных число это примерно равно 10 миллионам (Judd и Wyszecki, 1975; Pointer и Attridge, 1998; McCamy, 1998; Pointer, 1998).

Чтобы 24-битовая система могла воспроизводить такое количество стимулов, ее колориметрическое пространство должно быть полностью перцепционно-равномерным. Мы знаем, что более или менее перцепционно-равномерную серую шкалу дает L^*-функция цветовых пространств CIELAB и CIELUV (см. раздел 8.8). Количество рабочих L^*-значений определяемо свойствами носителя изображений и условиями просмотра, однако максимальный диапазон обычно равен примерно 90 единицам: от примерно 10 (или чуть ниже) по черной точке (в идеальных условиях) до 100 по белой.

Если едва заметное тональное отличие между двумя стимулами принять за единицу L^*, то минимальное количество тональных уровней, позволяющих уйти от паразитного дробления градиентов, будет равным $100 - 10 = 90$, т.е. ≈ 6.5 бит. Однако когда при кодировании тональной информации используются линейные сигналы, представляющие коэффициент яркости, то, согласно корнекубическому закону Стивенса (определяющему взаимоотношения между фотометрической яркостью стимула и ощущением его светлоты), шагу в 1 единицу по L^* (к примеру, между 10 и 11) будет соответствовать шаг яркости 0.135 (модуль разности между коэффициентом яркости 1.126 и 1.261). Иными словами, диапазон коэффициентов яркости от 1.126 до 100 (то есть 98.874) следует представлять дискретными значениями с шагом 0.135. Следовательно, количество яркостных ступеней на диапазон в этом случае должно быть равным 98.874/0.135, то есть 733, что требует разрядности кодирования минимум в 9.6 бит (≈ 10 бит). То есть, для того чтобы система могла воспроизвести все различимые стимулы в рамках своего охвата, необ-

ходимо 10-битное линейное кодирование на каждый трихроматический канал (в сумме 30 бит).

Если интегральная оптическая плотность оригиналов в данном издании не постоянна, то линейному кодированию потребуется еще бóльшая разрядность, к примеру: оптическая плотность вуали слайдов (т.е. оптическая плотность их белой точки) может варьировать в пределах до 4-х крат, а у негативов до 16 крат и выше. Следовательно, для кодирования дополнительного шестнадцатикратного диапазона оптических плотностей потребуется еще 4 бита информации на каждый трихроматический канал, что в целом составит $(10+4)\times 3 = 42$ бит.

30.3 ПРОСТРАНСТВЕННОЕ КОДИРОВАНИЕ

Теперь мы должны обсудить вопросы пространственного кодирования визуальной информации, для чего будем рассматривать изображение как массив плотно соседствующих микроэлементов квадратной формы, именуемых *пикселами* и упакованных в ряды и колонки (хотя в ряде случаев используются иные конфигурации).

Общее количество пикселов, необходимое полноценному изображению, зависит от ряда факторов, в частности от разрешения, задаваемого пространственным размером будущей репродукции и предполагаемым расстоянием ее просмотра. В целом принято считать, что стандартная 35-мм фотографическая система обеспечивает должный уровень пространственного разрешения воспроизводимого ею изображения (24×36 мм), что эквивалентно матрице пикселов 2350×3530, то есть примерно 8×10^6. Данная цифра выведена из того допущения, что среднее разрешение 35-мм слайда равно примерно 49 циклам (парам линий) на мм (98 пикселов/мм).

30.4 ТОНАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЕ КОДИРОВАНИЕ

Теперь, исходя из известных нам требований, предъявляемых к тональному и пространственному кодированию визуальной информации, получаем следующее выражение: $14\times 3\times 8 = 336\cdot 10^6$ бит или 336 Мбит. Заметим, что группа из 8 бит именуется *байтом*, следовательно 336 Мбит = 42 Мбайт.

Издательские системы легко управляются с таким объемом информации, но в прочих секторах индустрии изображений, в частности в любительской фотографии и цветном телевидении, обработка такого количества данных уже затруднительна, а в последнем случае едва ли возможна, и поэтому из изображения стараются удалить всю визуально не значимую информацию. Однако даже в издательском процессе, оперирующим, как уже было сказано, огромными массивами данных, от излишка информации все же стараются избавляться, дабы сократить время обработки материала.

30.5 УЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Одним из простейших путей допустимого снижения разрядности кодирования изображений разной интегральной оптической плотности является регулировка интенсивности светового потока при сканировании. Было показано, что если интенсивность эта обратно пропорциональна интегральному коэффициенту пропускания оригинала,

то можно сэкономить 4 бита на каждый трихроматический канал, то есть общее число бит снизится до $10 \times 3 \times 8 = 240$ Мбит (30 Мбайт).

Альтернативным и наиболее популярным способом достижения того же результата является кодирование только в том диапазоне, что задан черной и белой точками оригинала (динамический диапазон оригинала), т.е. его минимальной и максимальной оптическими плотностями.

30.6 НЕЛИНЕЙНОЕ ТОНАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ

Разрядность кодирования визуальной информации (и, следовательно, размер файла изображения) можно существенно понизить, если найти способы дискретизации с большей визуальной равномерностью, чем при кодировании линейном. К таким способам относятся логарифмическая и гамма-предыскаженная дискретизация.

30.6.1 Логарифмическое кодирование

Мы знаем, что логарифмические шкалы визуально равномернее шкал линейных и одну из логарифмических шкал можно записать как $50\mathrm{Lg}(100R)$, где R — это коэффициент фотометрической яркости стимула. Данная запись (которая, заметим, эквивалентна разности между стократной и пятидесятикратной оптическими плотностями) выбрана исходя из того, что при R = 1.0 (100% яркости стимула) уровень сигнала равен 100.

Логарифмическая шкала перцепционно равномерна по крайней мере в светах, и шаг приращения яркости на единицу приращения L^*, скажем от 99 до 100, определится разностью между $R = 100$ и $R = 99.436$, то есть 0.564. Следовательно, шаг дискретизации диапазона яркостей от $R = 2.577$ (значение на логарифмической шкале, соответствующее $L^* = 10$) до $R = 100$ должен быть равен 0.564. Таким образом, требуемое количество уровней дискретизации окажется равным $(100 - 2.577)/0.564 \approx 173$, то есть порядка 8 бит, что радикально меньше, чем при линейном 10-битном кодировании (см. табл. 30.1 и рис. 30.1).

Наконец, отметим, что для реализации идеи логарифмического кодирования необходим логарифмический усилитель сигнала.

30.6.2 Гамма-предыскаженное кодирование

Альтернативным логарифмическому является использование сигнала, эквивалентного гамма-предыскаженному яркостному сигналу E'_Y, применяемому в широковещательном телевидении. Яркостную шкалу в этом случае можно выразить как $12.33(100R)^{1/2.2} = 12.33E'_Y$. Коль скоро E'_Y не является истинным яркостным сигналом (см. раздел 19.13), данное выражение полностью адекватно диапазону лишь ахроматичных стимулов и более или менее соответствует диапазону околонейтральных. Приведенное выражение также предполагает, что если $R = 100$ (уровень яркости стимула 100%), то величина сигнала тоже равна 100.

E'_Y-сигнал обеспечивает перцепционную равномерность тоновой шкалы, как минимум, в ее тенях, и шаг приращения яркости на единицу приращения L^*, скажем от 10 до 11, определится модулем разности между $R = 13.013$ и $R = 13.701$, то есть 0.688. Иными словами, шаг дискретизации диапазона яркостей от $R = 13.013$ (значение на E'_Y-шкале, соответствующее $L^* = 10$) до $R = 100$ должен быть равен 0.688. Таким обра-

ТАБЛИЦА 30.1 Требуемое количество уровней дискретизации при разных вариантах нелинейного кодирования яркостной информации

	L^*	$100R$	$50\lg(100R)$	$12.33E'_Y$
Белая точка	100	100	100	100
Суббелая точка	99	97.4	99.436	98.8
ΔL^*	1	2.6	0.564	1.2
Предчерная точка	11	1.261	5	13.701
Черная точка	10	1.126	2.577	13.013
ΔL^*	1	0.135	2.423	0.688
Диапазон от белого до черного	100 – 10 = 90	100 – 1.126 = 98.874	100 – 2,577 = 97.4	100 – 13,013 = 86.987
Диапазон/Отличие = требуемое количество уровней	90/1 = 90	98.874/0.135 = 733	97.4/0.564 = 173	6.987/0.688 = 126
Двоичное представление	$2^7 = 128$	$2^{10} = 1024$	$2^8 = 256$	$2^7 = 128$
Рязрядность (бит)	7	10	8	7

зом, требуемое количество уровней дискретизации окажется равным $(100-13.013)/0.688 \approx 126$, то есть порядка 7 бит.

Однако стоит сказать, что 128 уровней сигнала при 7-битном кодировании дают очень маленький запас на разного рода погрешности, поэтому и в случае логарифмического кодирования, и в случае кодирования гамма-предыскаженного показана 8-битная дискретизация сигнала (см. табл. 30.1 и рис. 30.1).

* * *

При использовании одного из описанных вариантов нелинейного кодирования и при условии, что разрядность этого кодирования на каждый канал равна требуемой разрядности визуально равномерной серой шкалы, общий объем информации (по кадру 24×36 мм) снижается до $8\times3\times8 = 192\cdot10^6$ бит (24 Мб).

30.7 КОДИРОВАНИЕ С УЧЕТОМ РАЗМЕРА ЦВЕТОВОГО ОХВАТА

Разрядность кодирования зависима также и от размеров цветового охвата стимулов, воспроизводимых той или иной системой. Мы знаем, что цветовой охват отражающих контонных отпечатков понижен против расчетного из-за многократных проходов света через слои краски, а полутоновых отражающих — еще и из-за их точечной структуры. Развернем сей тезис в двух следующих подразделах.

30.7.1 Контонные изображения

Если показатель преломления краски ощутимо выше, чем таковой у воздуха (к примеру, 1.5 — как у желатина), и если имеет место оптический контакт этой краски с рассеивающей подложкой (к примеру, бумагой), то назад к наблюдателю из слоя крас-

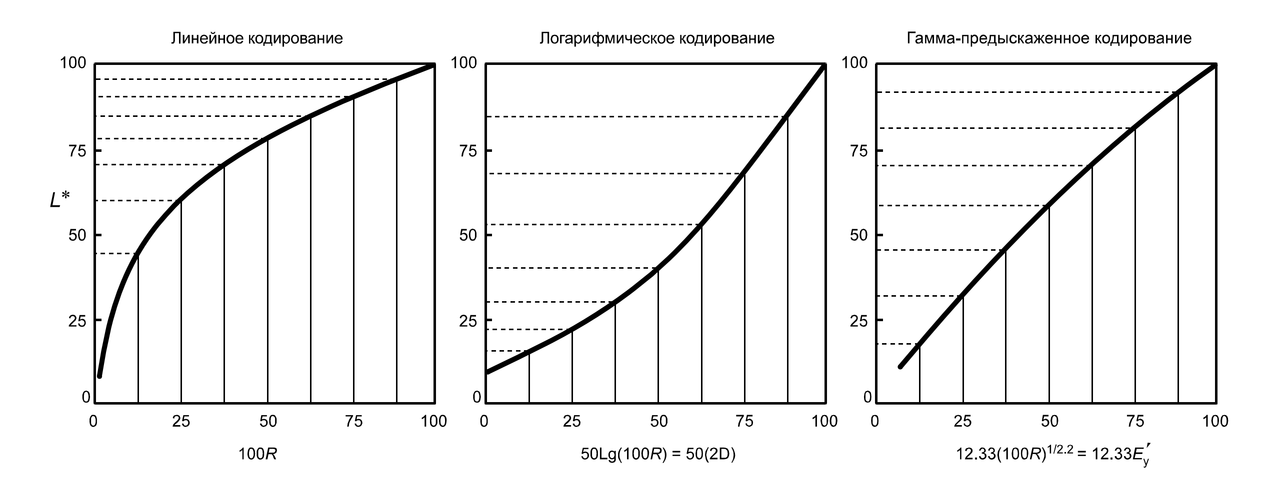


Рис. 30.1 Распределение L^*-значений (ось ординат) при линейном, логарифмическом и гамма-предыскаженном кодированиях яркостной информации о стимулах сцены или ее первичного изображения (ось абсцисс). Хорошо видно, что распределение L^*-значений наименее равномерно при линейном кодировании и наиболее равномерно — при гамма-предыскаженном.

ки фотоны возвращаются лишь в рамках т.н. *предельного угла* (см. раздел 13.9). За пределами этого угла свет подвергается *полному* внутреннему отражению (см. рис. 13.1), после чего вновь пытается прорваться наружу (и так несколько раз). То есть, мы видим, что свет многократно проходит сквозь слой колоранта.

Чем больше таких проходов, тем менее они значимы, когда поглощательная способность слоя краски велика. Но когда коэффициент поглощения краски мал, факт множественных проходов света сквозь красочный слой имеет первостепенное значение.

Если предположить, что 50% света, упавшего на отпечаток, остается внутри слоя краски после каждого двойного прохода сквозь этот слой, то на разных оптических плотностях на пропускание D_T (то есть, соответственно, при разных коэффициентах пропускания краски — T) часть упавшего на отпечаток света будет возвращаться назад в количествах, показанных в табл. 30.2 (некоторым ростом оптической плотности, вызванным увеличением длины пути светового потока, можно пренебречь). Сумма сих величин даст коэффициент отражения R, сопряженный с величиной оптической плотности на отражение D_R. Отношение D_R/D_T можно назвать *коэффициентом роста оптической плотности на отражение,* и очевидно, что коэффициент этот растет по мере снижения D_T.

При показателе преломления слоя краски равном 1.53 (как уже было сказано, типичное значение по желатину) только 38.6% упавшего света остается внутри этого слоя, а рост оптической плотности на отражение приходится в основном на увеличение длины пути хода светового потока. Сие ведет к тому, что величина D_R/D_T оказывается чуть больше, чем в табл. 30.2. Множественные проходы больше усиливают поглощение на малых оптических плотностях, чем на высоких, повышая тем самым величину отношения паразитных поглощений к полезным (см. рис. 13.3).

Если концентрация красителя (или краски), имеющего два не равных друг другу паразитных поглощения, растет, то более выраженное паразитное поглощение будет иметь больший эффект, чем менее выраженное, к примеру: cyan-краситель синеет на высоких концентрациях, поскольку его большее паразитное поглощение в средневол-

ТАБЛИЦА 30.2 Расчет оптических плотностей на отражение красочного слоя, находящегося в оптическом контакте с рассеивающей подложкой

D_T	1	0.1	0.01	0
T	0.1	0.794	0.977	1
Количество проходов				
2	$(0.5)(0.1)^2 = 0.005$	$(0.5)(0.794)^2 = 0.315$	$(0.5)(0.977)^2 = 0.477$	0.500
4	$(0.5)2(0.1)^4 = 0.000025$	$(0.5)2(0.794)^4 = 0.099$	$(0.5)2(0.977)^4 = 0.228$	0.250
6	$(0.5)3(0.1)^6 = 0.000000$	$(0.5)3(0.794)^6 = 0.020$	$(0.5)3(0.977)^6 = 0.104$	0.125
8		$(0.5)4(0.794)^8 = 0.002$	$(0.5)4(0.977)^8 = 0.043$	0.062
10		$(0.5)5(0.794)^{10} = 0.000$	$(0.5)5(0.977)^{10} = 0.015$	0.031
12			$(0.5)6(0.977)^{12} = 0.004$	0.016
14			$(0.5)7(0.977)^{14} = 0.000$	0.008
Общий R	0.005025	0.436	0.871	0.992
D_R	2.30	0.360	0.06	
D_R/D_T	2.3	3.6	6	

новой («зеленой») части спектра растет быстрее, чем его же коротковолновое («синее») паразитное поглощение.

Предположим теперь, что у некоего идеального cyan-красителя оптическая плотность на пропускание за синим фильтром равна 0.3, за зеленым фильтром — 0.6, за красным — 2.0, что эквивалентно соответственно 50%, 25% и 1% пропускательным способностям по коротковолновой, средневолновой и длинноволновой частям видимого спектра; следовательно, отношение коэффициента пропускания в коротковолновой части спектра к таковому в средневолновой окажется равным 2:1 (см. рис. 30.2 вверху).

Если количество колоранта уменьшено так, что оптическая плотность за красным фильтром становится равной 0.297, за синим и зеленым фильтрами соответственно 0.045 и 0.089, а соответствующие коэффициенты пропускания — 90%, 81% и 50.5%, то отношение коэффициента пропускания по коротким волнам к таковому по средним будет составлять всего лишь 90/81, то есть — 1.11.

Сказанное проявляет себя образованием некоего локуса на диаграмме цветностей: зеленоватый cyan-колорант по мере роста концентрации становится синеватым (рис. 30.2 внизу). Отметим, что аналогичные эффекты возникают и в отражающих отпечатках.

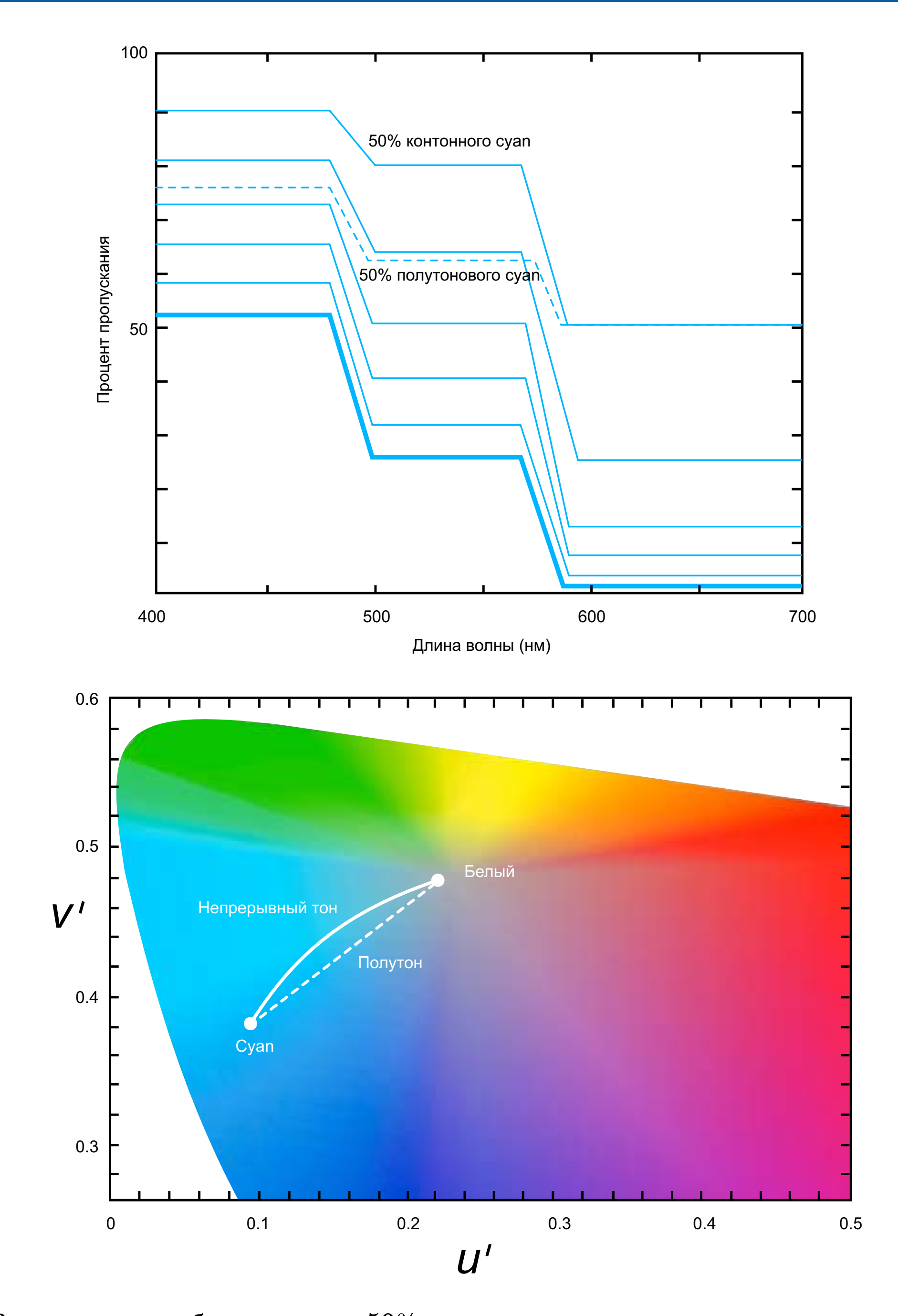


Рис. 30.2 *Вверху*: линия, обозначенная «50% контонного cyan», демонстрирует спектральный коэффициент пропускания гипотетического cyan-красителя при/в той его концентрации, при которой пропускание по длинноволновой («красной») части видимого спектра составляет 50.5%; прочие линии демонстрируют спектральный коэффициент пропускания на бо́льших концентрациях: хорошо видно, что отношение количества пропущенного средневолнового («зеленого») света к количеству пропущенного коротковолнового («синего») падает, смещая цветовой тон красителя в синюю сторону. Пунктирная линия демонстрирует процент пропускания полутонового cyan при 50% заполнения поверхности: хорошо видно, что при той же величине пропускания по длинноволновой части спектра, что и у 50% контонного cyan, пропускание по коротковолновой и средневолновой частям много меньше.

Внизу: локус цветностей градиентов контонного и полутонового cyan-красителя от полной концентрации (100% заполнения в полутоне) до нуля.

30.7.2 Полутоновые изображения

Когда изображение разбито на точки (традиционная полиграфия), эффекты, вызванные паразитными поглощениями, еще более выражены. Сие можно продемонстрировать следующим примером (в котором для простоты мы вновь рассмотрим изображение на просвет, помня, что отражающее ведет себя аналогично): в полутоновом изображении cyan-колорант при 50% заполнении даст коэффициент пропускания в длинноволновой («красной») области спектра, равный $1/2(100+1)=50.5\%$, а в средневолновой («зеленой») и коротковолновой («синей») областях соответственно $1/2(100+25)=62.5\%$ и $1/2(100+50)=75\%$ (пунктирная линия на рис. 30.2 внизу).

В сравнении с контонным изображением при тех же 50.5% пропускания по длинноволновой области полутоновое изображение даст по средним волнам 62.5% вместо 81%, а по коротким — 75% вместо 90%. Сие снижает охват цветностей и понижает фотометрическую яркость стимулов, в создании которых участвует cyan-краситель (если, конечно, нет возможности выполнить маскирование, снижающее количество magenta- и yellow-колорантов).

В цветовом тоне стимулов, воспроизводимых контонными и полутоновыми изображениями, тоже имеются отличия: в полутоновом изображении все стимулы, образуемые градиентом cyan-точек от 0 до 100%, имеют постоянную доминирующую длину волны (пунктирная линия на рис. 30.2 внизу), но, как мы уже видели, в аналогичном контонном cyan-градиенте наибольшее отношение коэффициента пропускания в средневолновой части спектра к коэффициенту пропускания в коротковолновой окажется в середине градиента.

Мы знаем, что в полиграфии с целью обеспечения полноценного визуального контраста изображений активно практикуют применение дополнительной черной краски в глубоких тенях изображений. В средних тонах и даже светах черный кладут по принципу GCR (см. раздел 29.14), который позволяет снизить общий расход красок, повысить скорость их высыхания и поднять визуальную резкость изображений.

Иногда с целью расширения цветового охвата цветорепродукционной системы, а также снижения степени хроматических сдвигов при смене освещения в дополнение к триадному комплекту колорантов применяются оранжевая, зеленая и фиолетовая краски.

30.7.3 Цифровые изображения

Так какова же должна быть разрядность кодирования изображений в рамках цветового охвата типичной цифровой цветорепродукционной системы? Как было показано ранее, 8-битное кодирование яркостей вполне адекватно задаче дискретизации L^*-параметров, представляющих шкалу результатов восприятия ахроматических стимулов (т.е. шкалу ощущений серого), но теперь мы должны выяснить, какая разрядность потребуется для дискретизации оставшейся (и много большей) части цветового охвата.

Сие можно выполнить, используя a^*- и b^*-переменные системы CIELAB: если использовать 8-битное кодирование по каждой из этих переменных в диапазоне от -127 до $+128$, то размер каждого шага дискретизации окажется равным одной единице ΔE, что, казалось бы, вполне приемлемо. Действительно, предложенное в целом адекватно поставленной задаче, но при этом нельзя забывать, что самоя CIELAB-система достаточно неравномерна, и если имеет место изменение значения обеих переменных на 1, а также на 0.5 по L^*, то общее отличие составит $\sqrt{(1^2+1^2+0.5^2)}$, то есть 1.5. Стимулы, пер-

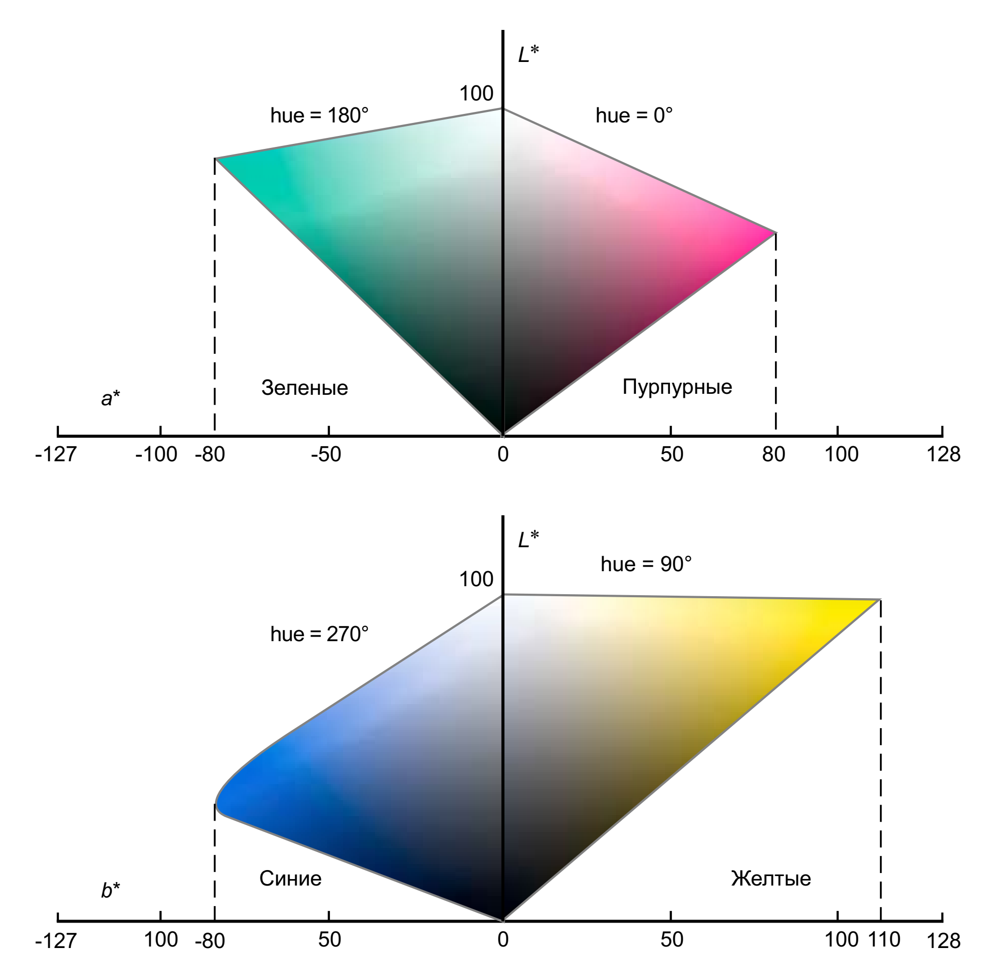


Рис. 30.3 Срезы цветового охвата типичной субтрактивной системы по плоскостям постоянного цветового тона со значениями 0°, 90°, 180° и 270°.

цепционное отличие между которыми равно 1.5 ΔE, уже могут дать паразитные контурные эффекты.

Однако же перцепционные хроматические показатели стимулов, воспроизводимых большинством цветорепродукционных систем, лежат в пределах от −80 до +80 по a^*-оси и от −80 до +110 по оси b^* (рис. 30.3), и поэтому при 8-битном кодировании этих диапазонов наибольшее значение ΔE не выходит за пределы 1.0. Плюс к тому, поскольку в реальных цифровых системах всегда присутствуют некие случайные флуктуации (т.н. *шум*), то данный уровень ΔE можно признать вполне удовлетворительным.

Несмотря на то что предельные хроматические значения охвата типичной субтрактивной системы достигают, как уже было сказано выше, от −80 до +80 по a^*-оси и от −80 до +110 по оси b^*, сие имеет место лишь на каком-то одном из уровней L^*. Следовательно, цветовой охват репродукционной системы в той или иной плоскости цветового тона (т.е. охват стимулов того или иного постоянного цветового тона) по форме своей стремится к треугольнику, в одном из углов которого расположены максимальное a^*- или b^*-значения, а в оставшихся двух соответственно черная и белая точки этого охвата (рис. 30.3).

Мы видим при этом, что диапазон используемых значений сокращается примерно на четверть против формального (т.е. от −127 до +128) и при дискретизации этого диа-

пазона общее количество бит падает с $(8+8+8)\times 8 = 192$ Мбит до $(8+7+7)\times 8 = 176$ Мбит (22 Мбайт). Однако на практике сократить количество уровней дискретизации по размеру охвата цветорепродукционной системы довольно сложно, но если этого добиваются, то описанная выше экономия становится возможной.

30.8 ЯРКОСТНЫЙ И ЦВЕТОРАЗНОСТНЫЕ СИГНАЛЫ

Хорошо известно, что экономии полосы телевизионного вещания добиваются путем применения яркостного и цветоразностных сигналов (вместо привычных трихроматических). Полосу красно-зеленого цветоразностного сигнала можно сократить до одной четверти ширины полосы сигнала яркостного, а полосу желто-синего — до одной десятой (см. раздел 19.7). В NTSC такая редукция выполнена только по горизонтальному направлению, а в системах PAL и SECAM полоса обоих цветоразностных сигналов сокращена до 1/4 ширины полосы сигнала яркостного и по обоим направлениям (т.е. горизонтальному и вертикальному).

В открытых широковещательных системах благодаря гамма-коррекции сигнала (см. раздел 19.13) часть яркостной информации передается за счет цветоразностных сигналов, что несколько снижает силу возможной компрессии. В закрытых системах, например в настольных издательских, яркостный сигнал можно оставить истинным, полосу одного из цветоразностных можно сжать до одной четверти ширины полосы сигнала яркостного, а полосу второго — до одной десятой. Сжатие выполнимо по обоим направлениям. То есть, в сравнении с условной, равнополосной по всем трем каналам системой (где b — ширина полос), получим, что полоса сигнала яркостного останется равной $1b$, полоса красно-зеленого сигнала станет равной $1/(4\times 4) = 1/16b$, а желто-синего $1/(10\times 10) = 1/100b$. Следовательно, требуемый объем информации снижается с $(8+7+7)\times 8 = 176$ до $8\times 8 + 7\times(8/16) + 7\times(8/100) = 68.06$ Мбит (8.51 Мбайт).

Однако, так же как и в широковещательном телевидении, полностью отделить цветоразностные сигналы от сигнала яркостного достаточно трудно, поэтому наиболее реалистичным сценарием является сокращение полосы до одной четверти по каждому из цветоразностных сигналов. Требуемый объем информации в этом случае становится равным $8\times 8 + 7\times(8/4) + 7\times(8/4) = 92$ Мбит (11.5 Мбайт).

Напомним, что все приведенные выше расчеты строились по 35-мм слайд-изображению.

30.9 УЧЕТ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗРЕНИЯ

В глазном яблоке человека, как в любой оптической системе, модуляции интенсивности света, воздействующего на сетчатку, прогрессивно падают по мере роста пространственной частоты зрительных стимулов (см. рис. 18.16). Следовательно, число тональных уровней, которое требуется для ухода от паразитного оконтуривания градиентов в изображении, снижается по мере роста пространственной частоты элементов этого изображения.

В традиционной фотографии из-за светорассеяния в слоях фотоматериала тональное разрешение изображения падает по мере роста пространственной частоты его элементов, но сей эффект обычно незаметен, поскольку в целом повторяет контур MTF зрительной системы человека. Иное дело в цифровой технологии.

30.9.1 JPEG-алгоритм

Объединенная группа экспертов по машинной обработке фотографических изображений (Joint Photographic Experts Group — JPEG) Международной организации по стандартизации (ISO), исходя из упомянутой выше особенности зрительной системы человека, разработала весьма и весьма эффективный метод редукции объема информации в цифровых изображениях.

JPEG-алгоритм дробит цифровое изображение на квадратные подобласти, представляющие собой т.н. *макроблоки* размером 8×8 пикселов. Сигналы по каждому макроблоку пропускаются через электронные фильтры, делящие эти сигналы по пространственным частотам соответствующих им стимулов. Частотный диапазон фильтров составляет от 0 до 4 циклов на макроблок с промежуточными частотами в 1, 1.5, 2, 2.5, 3 и 3.5 цикла по вертикальному и горизонтальному направлениям во всех возможных комбинациях, давая в итоге 64 возможных сочетания. Поскольку в работе фильтров применяется т.н. *косинусная функция*, процесс фильтровки известен как *дискретное косинусное преобразование — Discrete Cosine Transform* (*DCT*). Такая система в целом аналогична двухмерному Фурье-преобразованию сигнала и при условии отсутствия какой-либо компрессии позволяет полностью восстановить сигнал оригинальный.

Сокращая количество уровней тональной дискретизации по мере роста пространственной частоты элементов изображения, можно ощутимо уменьшить общие требования к разрядности кодирования и, соответственно, уменьшить размер файлов изображений. Отметим также, что опытные художники активно пользуются этим приемом, оставляя мелким деталям изображения лишь несколько тональных уровней.

JPEG-алгоритм дает возможность снизить разрядность кодирования еще двумя возможными способами:

— во-первых, поскольку в большинстве фотореалистичных изображений соседние пикселы обычно имеют одинаковые значения, кодируется лишь информация об отличиях между пикселами (что эквивалентно применению широких кистей в живописи). Такой дифференцированный подход к дискретизации визуальных данных является мощнейшим инструментом снижения разрядности кодирования, не приводящим к видимым потерям качества изображения. Он же активно применяется и в других алгоритмах компрессии, в частности таких, как Photo CD (см. раздел 24.8);

— во-вторых, учитывается статистический характер значений в прочих фильтрах (диагональные детали изображения обычно рассеянны — см. раздел 19.9), что также снижает требования к разрядности кодирования.

В конкретном приложении JPEG-алгоритм можно использовать для компрессии данных от 12 до 100 крат. Компрессия без визуальных потерь лежит на левом конце этого диапазона и уменьшает объем информации от $8\times8+7\times(8/4)+7\times(8/4)=92$ Мбит (11.5 Мбайт) до $92/12 = 7.67$ Мбит (0.95 Мбайт). Коль скоро мы договорились в свое время, что оптимальными являются 8×10^6 пикселов на 35-мм кадр, то в среднем при такой компрессии на 1 пиксел будет приходиться всего лишь 1 бит информации (что просто поразительно).

30.9.2 Алгоритм JPEG 2000

Использование макроблоков размером 8×8 пикселов ведет к некоторой паразитной визуальной «блочности» мелких деталей JPEG-изображения. Позднейшая версия JPEG-алгоритма — JPEG 2000 — лишена сего недостатка за счет того, что работа ве-

дется с изображением в целом, представляя последнее в виде пакета субизображений разного разрешения:

— на малых разрешениях (несмотря на то что при этом для ухода от паразитного оконтуривания требуется высокая разрядность кодирования) резкое снижение общего числа пикселов ведет к существенному уменьшению размера файла изображения;

— на высоких разрешениях для ухода от паразитного оконтуривания требуется гораздо меньшая разрядность кодирования визуальной информации, следовательно, несмотря на то, что самих пикселов больше, мы по-прежнему имеем возможность уменьшить размер файла.

На каждом из разрешений алгоритм JPEG 2000 задействует т.н. *двухмерное дискретное вейвлет-преобразование*, организующее пространственно-низкочастотные (low-pass) и пространственно-высокочастотные (high-pass) фильтры и позволяющее последним представить оригинальное изображение в четырех вариантах:

1. Низкой пространственной частоты по вертикали и горизонтали.
2. Высокой пространственной частоты по вертикали и горизонтали.
3. Высокой пространственной частоты по вертикали, но низкой по горизонтали.
4. Низкой пространственной частоты по вертикали, но высокой по горизонтали.

Несмотря на то что выполнение такого представления требует больших вычислительных ресурсов, оно позволяет добиться либо равной, либо даже бóльшей экономии размера файла изображения (чем при стандартном JPEG-алгоритме), но при этом с радикально меньшим числом заметных артефактов (Steingrimsson и Simon, 2003).

Дальнейшее сокращение объема файла изображения по схеме JPEG 2000 реализуемо путем локализации участков высокого разрешения в т.н. *зонах интереса* (Regions Of Interest — ROI), что выполняется с помощью специальных и довольно сложных алгоритмов.

30.10 КОДИРОВАНИЕ И КОМПРЕССИЯ В ТЕЛЕВИДЕНИИ ВЫСОКОЙ ЧЕТКОСТИ (HDTV)

Мы знаем, что в типичной HDTV-системе количество строк вдвое больше, чем в обычном телевидении (см. раздел 19.16), а также вдвое большее количество пар пикселов на строку (что позволяет увеличить формат кадра с 4/3 до 16/9). Однако сие неизбежно требует и увеличения примерно в 5.33 раза ($2 \times 2 \times 4/3$) ширины полосы вещания. То есть если ширина полосы обычной телесистемы составляет порядка 5 МГц, то в системе HDTV — 27 МГц. При разрядности кодирования яркостного сигнала в 8 бит требуемый битрейт составит $27 \times 8 = 216$ Мбит/с.

В системах высокой четкости цветоразностные сигналы обычно передаются по отдельной полосе, но при этом они подвергнуты компрессии в вертикальном и горизонтальном направлениях и занимают в сумме половину ширины полосы сигнала яркостного. В результате общий требуемый битрейт вырастает до $216 \times 1.5 = 324$ Мбит/с, либо, если применяется т.н. *мультиплексная передача* цветоразностных сигналов (реализуемая, к примеру, за счет их временно́го чередования), — до $216 \times 1.25 = 270$ Мбит/с.

При передаче кинофильмов (но не сцен прямого эфира) информацию по каждому следующему полукадру можно сравнить с информацией от предыдущего и тем самым определить т.н. *вектор движения*. Используя этот вектор в работе т.н. MPEG-алгоритма (см. раздел 19.16), применяемого в телевидении высокой четкости, а также используя описанный ранее JPEG-алгоритм, можно добиться компрессии с коэффициентом 15, т.е. снизить требуемый битрейт в 15 раз: 270/15 = 18 Мбит/с. При частоте кадров

30 кадр/с сие эквивалентно 18/30 = 0.6 Мбит/кадр. Коль скоро кадр HDTV содержит порядка 2×10^6 пикселов на изображение, то на один пиксел в этом случае приходится всего лишь 0.3 бита информации ($0.6\times10^6/2\times10^6 = 0.3$), что в три с небольшим раза меньше, чем требуется статичным изображениям (1 бит на пиксел).

30.11 ЦИФРОВОЙ КИНЕМАТОГРАФ

В кинематографии цифровые технологии вначале применялись при разного рода промежуточных манипуляциях (см. раздел 12.11), но сегодня цифровые системы активно используются как при съемке, так и при кинопроекции: в художественных лентах объем визуальной информации огромен, но их цифровое распространение на рынке оказывается весьма и весьма выгодным.

Однако же, чтобы цифровая *кинопроекция* достигла уровня качества проекции традиционной, требуются специальные и весьма дорогостоящие цифровые проекторы с расширенным цветовым охватом (Harrison, 2003).

30.12 ВЫВОДЫ

Итак, из всего сказанного выше мы видим, что высококачественное цифровое цветовоспроизведение вполне осуществимо. Более того, всегда имеется возможность избежать неудобств, связанных с необходимостью обработки большого объема данных: добиваются сего за счет различных методов компрессии, позволяющих понизить требуемое число бит на пиксел с 42 до 1 — у статичных изображений и до 0.3 бит/пиксел — у изображений движущихся.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Harrison, C., IS&T and SID's Eleventh Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies, Applications, pages 313 to 318. IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (2003).
Judd, D.B., and Wyszecki, G., Color in Business, Science, and Industry, 3rd Edn., p. 388, Wiley, New York (1975).
McCamy, C.S., Color Res. Appl., 23, 337 (1998).
Pointer, M.R., Color Res. Appl., 23, 337 (1998).
Pointer, M.R., and Attridge, G.G., Color Res. Appl., 23, 52 (1998).
Steingrimsson, U., and Simon, K., J. Imaging Sci. & Tech., 47, 572 (2003).

ЛИТЕРАТУРА

Gonzales, R.C., and Woods, R.E., Digital Image Processing, Addison Wesley, Reading MA (1993).
Poynton, C.A., A Technical Introduction to Digital Video, Wiley, New York (1996).
Russ, J.C., The Image Processing Handbook, 3rd Edn., CRC Press, Raleigh NC (1990).

31 ОЦИФРОВЫВАЮЩИЕ ФОТО- И ВИДЕОСЪЕМКА

31.1 ВВЕДЕНИЕ

История трихроматической регистрации сцен электронными камерами (теле-, видео-, фото-) — плоть от плоти история широковещательного цветного телевидения (см. гл. 20). Если не считать самых первых моделей, то относительно современные аппараты строились на передающих трубках, в частности плюмбиконах. С помощью дихроичных призм они делили свет на трихроматические потоки, каждый из которых падал на «свою» передающую трубку. Сегодня практически повсеместно трубки заменены матрицами CCD- или CMOS-элементов[1], но светоделительные призмы применяются как и прежде. При этом единичные матрицы используются без светоделителя — на них накладывается мозаика окрашенных фильтров. Последнее обычно применяется в камкордерах и цифровых фотокамерах.

31.2 МАТРИЦА ФИЛЬТРОВ

Поскольку субъективная резкость изображений определяется в основном яркостными отличиями между элементами этих изображений и поскольку «зеленый» трихроматический сигнал вносит наибольший вклад в яркостную составляющую регистрируемых стимулов, то (см. раздел 22.3), как правило, в светочувствительной матрице большее число пикселов покрыто зелеными фильтрами и результирующее соотношение обычно составляет 1:2:1, то есть на один красный и синий фильтр — два зеленых (рис. 20.9).

Встречаются и другие варианты фильтровой мозаики, например, в группе из четырех пикселов один фильтр — зеленый, один — голубой, один — пурпурный и один желтый. Вычитая «зеленый» сигнал из «желтого» и из «голубого», получают соответственно «красный» и «синий» трихроматические сигналы. Складывая и вычитая сигналы от разных ячеек в разных комбинациях, приходят к трем долям «зеленого» сигнала, двум долям «красного» и двум «синего», то есть RGB-соотношение в данном варианте сенсора составляет 2:3:2.

В еще одной конструкции матрицы используются красный, зеленый, синий и изумрудно-зеленый фильтры. Последний отвечает за отрицательные значения по красному трихроматическому каналу (Katoh, Mizukura, Nishio и Quan, 2003). Отметим, что вычитание сигналов приводит к некоторому нежелательному снижению соотношения «полезный сигнал/шум», а объединение сигналов от соседних ячеек — к некоторому падению пространственного разрешения результирующих изображений. Однако в целом описанная схема оказывается весьма и весьма практичной в ряде ситуаций.

---

[1] Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS) — комплементарная структура металл-оксид-полупроводник. Характеризуется меньшим быстродействием, но высокой плотностью размещения элементов, устойчивостью к шумам, а также малым потреблением энергии. — *Прим. пер.*

Еще один вариант конструкции сенсора предлагает компания Foveon: матрица представляет собой «сэндвич» из слоев разных спектральных чувствительностей, благодаря чему в мозаике фильтров отсутствует необходимость (Lyon и Hubel, 2002).

31.3 ПАМЯТЬ

В камкордерах аппаратный сигнал обычно записывается на магнитную ленту, а в цифровых фотокамерах на специальную флэш-карту либо во встроенную электронную память аппарата. Экономия памяти реализуется за счет разнообразных видов компрессии, в частности за счет применения ее MPEG- и JPEG-алгоритмов (см. разделы 30.9 и 30.10).

31.4 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Когда электронная камера (обычная телекамера, к примеру) ориентирована на воспроизведение изображений с помощью того или иного аддитивного трихроматического устройства, то есть монитора, выдающего (за счет работы люминофоров) красный, зеленый и синий кардинальные стимулы, то в идеале набор спектральных чувствительностей этой камеры должен представлять собой трихроматические кривые Стандартного наблюдателя по этим стимулам либо линейную комбинацию этих кривых (условие Лютера —Айвса) (см. раздел 7.4).

В широковещательном телевидении цветности кардинальных стимулов и эталонного белого стимула стандартизированы (см. раздел 21.13), и под стандарт подпадают по меньшей мере 709 люминофоров (стандарт ITU-R BT.709-1993). Трихроматические кривые Стандартного наблюдателя по кардинальным стимулам, воспроизводимым этими люминофорами, хоть и имеют в своем составе участки с отрицательными значениями, но при этом вполне удовлетворительно аппроксимируются матрицированием сигналов сенсора (см. раздел 19.12).

На рис. 31.1 (вверху) показан набор спектральных чувствительностей типичной телекамеры: сплошные линии нижнего рисунка демонстрируют эти же чувствительности, но подвергнутые матрицированию; пунктирные линии — трихроматические кривые Стандартного наблюдателя по кардинальным стимулам, воспроизводимым 709 люминофорами из упомянутого выше стандарта. Мы видим, что матрицирование весьма эффективно аппроксимирует кривые Стандартного наблюдателя по красному и зеленому каналам, но весьма неточно по синему. Так происходит потому, что зона спектральной чувствительности камеры в коротковолновой части спектра довольно широка: сие неизбежная плата за относительно высокий коэффициент пропускания соответствующего (синего) фильтра матрицы.

Наконец, отметим, что разработка методов измерения спектральной чувствительности электронных камер являлась в свое время предметом серьезных исследований (Hubel, Sherman и Farell, 1994).

31.5 ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Фотографическая ISO-чувствительность электронных (теле-, видео-, фото-) камер лежит в пределах от 100 до 6400 ISO/ASA и зависит от базовой чувствительности пикселов матрицы, характера фильтров или светоделителей, а также от допустимого уровня шума.

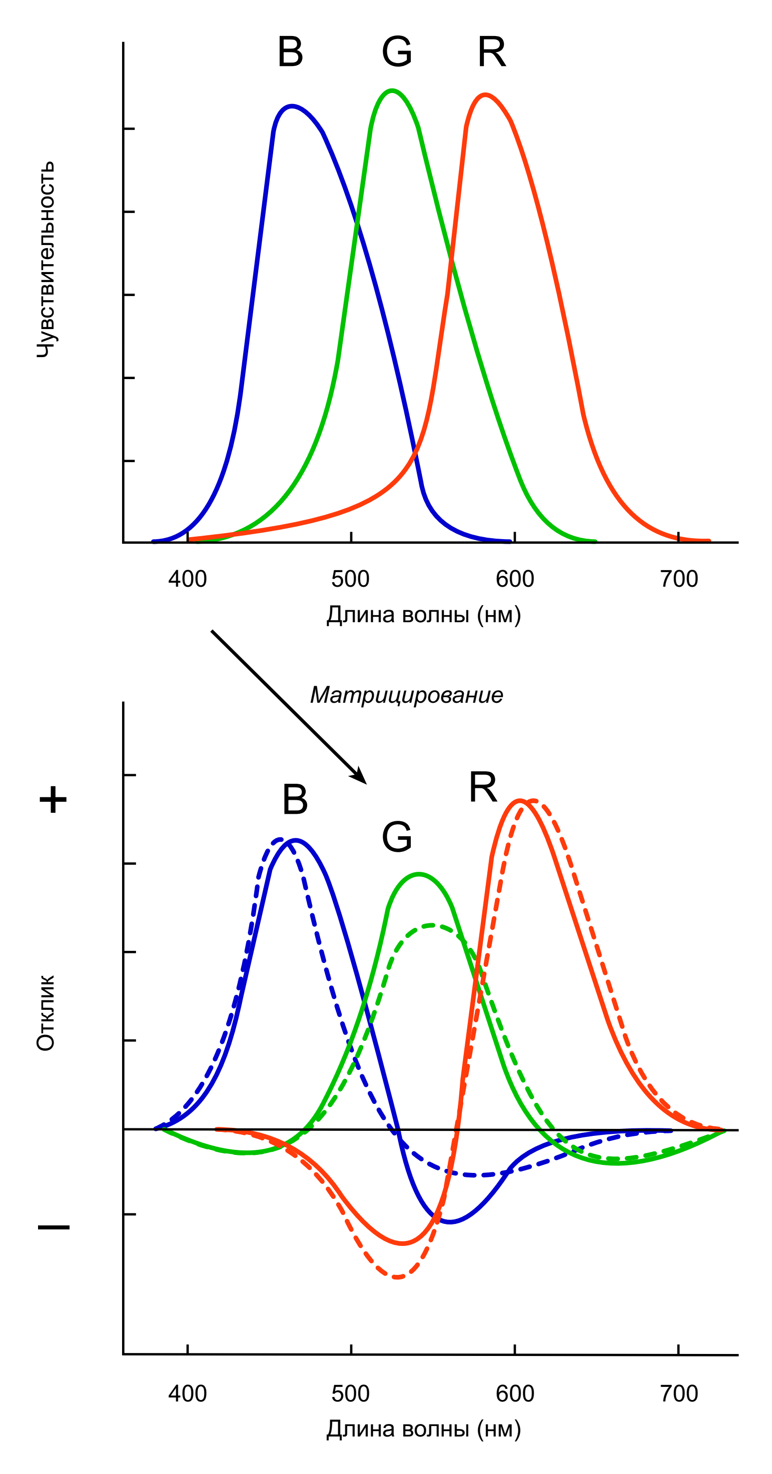


Рис. 31.1 *Вверху*: спектральные чувствительности типичной электронной камеры. *Внизу*: то же, но после матрицирования. Пунктирные линии — трихроматические кривые Стандартного наблюдателя по уравнивающим (кардинальным) стимулам стандарта ITU-R BT.709-1993, указывающие на вполне удовлетворительное соответствие спектральных чувствительностей камеры условию Лютера — Айвса.

Малый размер матрицы большинства цифровых фотокамер вынуждает применять объективы с меньшим фокусным расстоянием, чем у 35-мм камер, дабы достичь требуемой глубины резкости изображения.

31.6 КОЛИЧЕСТВО ПИКСЕЛОВ

Общее количество светочувствительных элементов в матрицах *теле*камер разных систем таково:

Система	Матрица	Общее число пикселов
VHS	240×360	76800
525-строчное телевидение	483×644	311052
625-строчное телевидение	575×767	441025
HDTV	1080×1920	2073600

Цифровые *фото*камеры по данному критерию можно разделить на три ценовых группы (см. ниже): количество пикселов результирующего изображения дано как половина от общего числа пикселов в светочувствительной матрице — сие есть следствие т.н. *пространственной пиксел-интерполяции*, выполняемой с целью формирования пикселов цифрового изображения из сигналов, полученных от покрытых фильтрами элементов матрицы. Понятно, что неизбежным следствием такой интерполяции является падение пространственного разрешения изображения.

Стоимость	Матрица	Общее кол-во пикселов в матрице	Кол-во пикселов в результирующем изображении
Высокая	2036×3060	6230160	3115080
Средняя	1600×2133	3412800	1706400
Низкая	480×640	307200	153600

Оцифровка кадра размером 24×36 мм, снятого обычной пленочной 35-мм камерой, имеет следующие характеристики:

Стоимость	Матрица	Общее кол-во пикселов
Очень низкая (+ обработка)	2400×3600	8640000

На рис. 31.2 в логарифмических шкалах дан график цен на цифровые фотокамеры как функция от количества пикселов в результирующем изображении, и мы видим, что рост этой цены слегка нелинеен. Отметим также, что существует весьма выраженная разница в соотношении «цена/кол-во пикселов» у цифровых и у обычных 35-мм пленочных камер (также см. рис. 31.2).

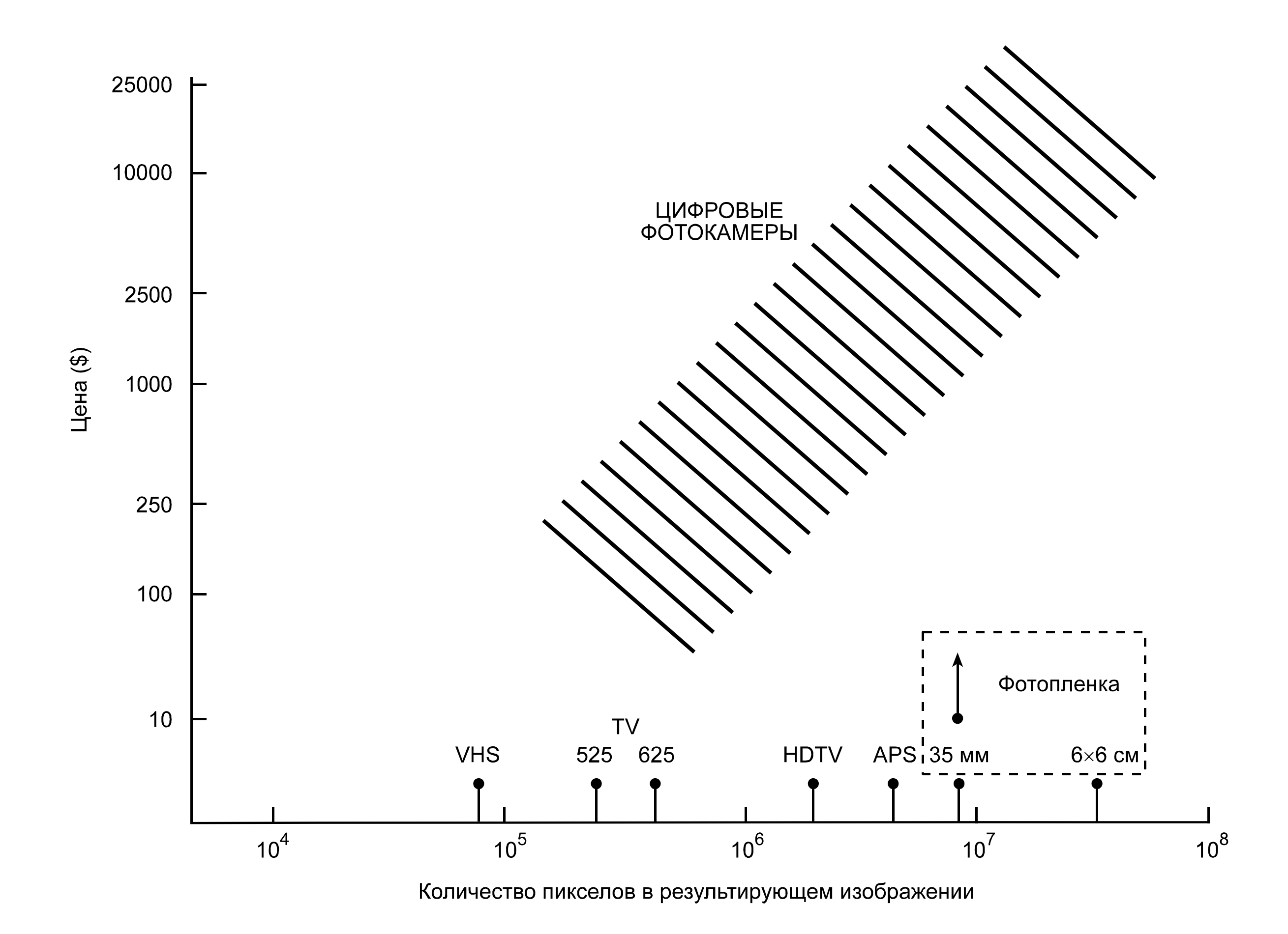


Рис. 31.2 Цена обычных цифровых фотокамер как функция от числа пикселов в результирующем изображении. Для сравнения даны аналогичные данные по обычной пленочной 35-мм камере (стрелка указывает на рост общей цены при учете стоимости обработки и сканирования фотоматериала).

31.7 ОБЩАЯ СХЕМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ КАМЕР

Возможные варианты обработки сигналов электронных камер даны на рис. 31.3.

Процесс начинается с того, что экспонирующий свет воздействует на сенсор, сигналы которого вначале используются для автоматического экспозамера, после чего происходит собственно захват первичного изображения сцены.

На следующем этапе сигналы сенсора линеаризуются путем т.н. *вычитающей коррекции* темнового тока, а также паразитной подсветки первичного изображения сцены, сформированного объективом камеры на поверхности этого сенсора.

31.7.1 Аналоговые системы

Аналоговые системы (аналоговые камкордеры и аналоговые телекамеры) для оптимизации экранного показа обычно выполняют матрицирование и гамма-предыска-

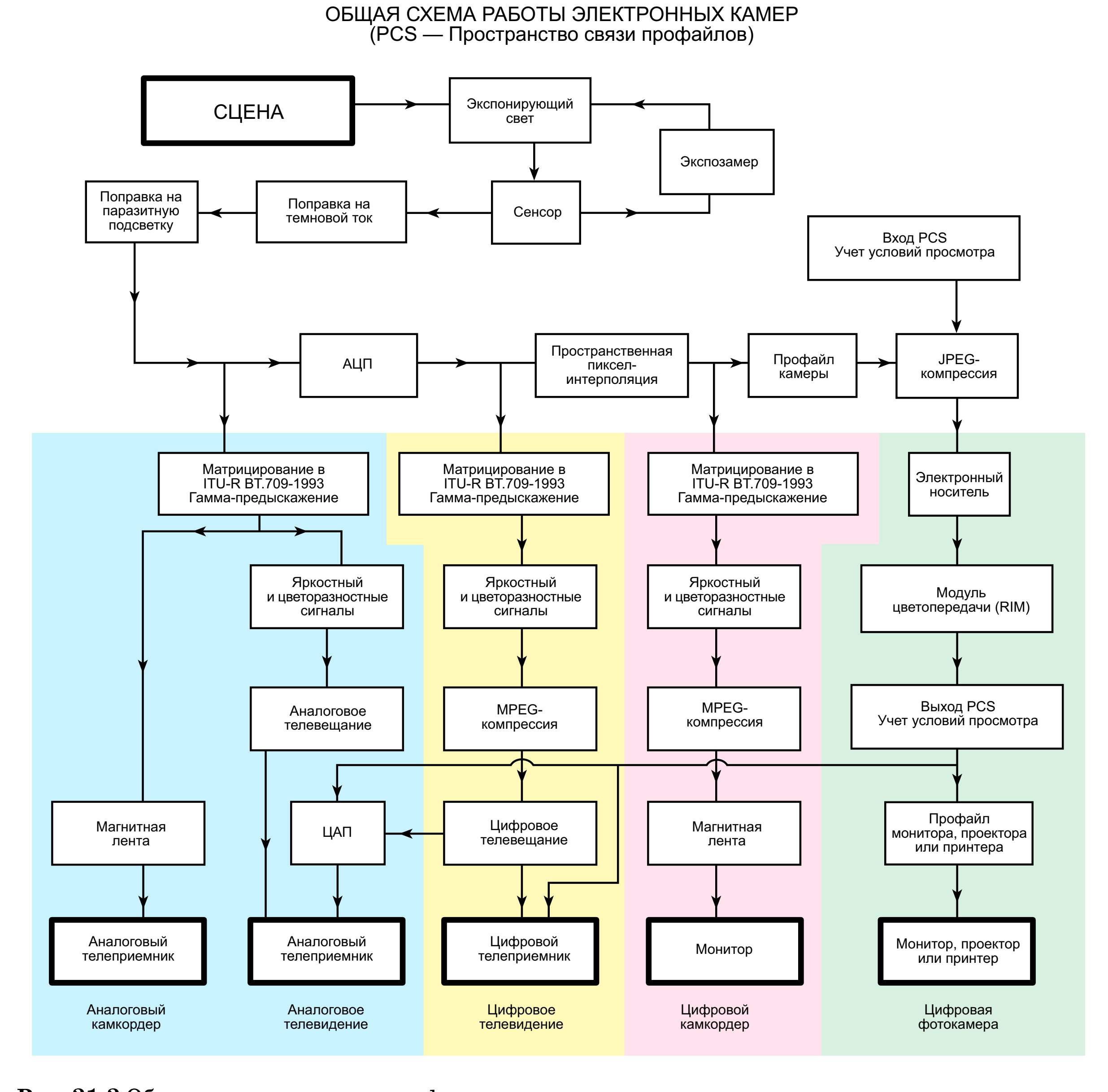


Рис. 31.3 Общая схема возможного функционирования электронных камер.

жение своих сигналов и используют последние либо непосредственно, либо через яркостно-цветоразностную стадию.

31.7.2 Цифровые системы

В цифровых системах сигнал дискретизируется посредством АЦП — аналого-цифрового преобразователя.

31.7.2.1 Цифровое телевидение

В тех цифровых системах, в которых сенсоры не покрыты мозаикой фильтров, то есть в варианте «светоделитель + три отдельных сенсора» (например, в ситуации циф-

рового широковещательного телевидения), сигналы матрицируются, гамма-предыскажаются, преобразуются в яркостно-цветоразностные сигналы, сжимаются по MPEG-алгоритмам и, наконец, визуализируются на цифровых устройствах отображения. Для воспроизведения изображений, сформированных этими сигналами, на аналоговых устройствах отображения требуется т.н. ТАП — *телевизионная абонентская приставка*, конвертирующая цифровой сигнал в аналоговый (т.е. цифро-аналоговый преобразователь — ЦАП).

31.7.2.2 Цифровые камкордеры

В тех цифровых системах, в которых сенсор покрыт матрицей фильтров, после выполнения аналогово-цифрового преобразования сигналы проходят через упомянутый выше пиксел-интерполятор, компенсирующий некоторую потерю пространственного разрешения изображения при его попиксельной сборке из сигналов сенсора. Сие типично для цифровых фотокамер и камкордеров.

31.7.2.3 Цифровые фотокамеры

Выходной сигнал цифровых фотокамер можно отправить на монитор, принтер или слайд-принтер либо на любое иное устройство, в частности цифровой проектор или компьютер. Стало быть, ситуация несколько сложнее, чем описанные ранее, и поэтому ей будет посвящен отдельный раздел.

31.8 ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ЦФК

Этапы обработки сигналов цифровой фотокамеры схематично представлены на рис. 31.4. Сразу оговоримся, что «sRGB» на схеме — это стандартное абстрактное трихроматическое пространство, о котором мы поговорим в разделе 31.10.

Итак, мы видим, что начальные этапы, показанные на рис. 31.4, те же, что и на рис. 31.3, однако перед стадией пиксел-интерполяции вводится процедура балансировки белого, и касается он как камкордеров, так и цифровых фотокамер (подробнее в разделе 31.9).

По умолчанию цифровые фотокамеры в качестве т.н. *входного пространства связи профайлов* (PCS — Profile Connection Space) используют матрицу для 709 возможных люминофоров, позволяющую выполнить учет входных факторов: динамического диапазона первичного изображения сцены на сенсоре, охвата цветностей этого изображения и условий просмотра.

Затем, после выполнения компрессии и сохранения данных в оперативной памяти, выполняется конверсия сигналов в трихроматическое пространство sRGB, что предшествует собственно экранному отображению или отправке команд на вход принтера.

В работе топовых моделей цифровых камер упомянутые выше процедуры иногда дополняются колориметрией цены, отрицательными значениями в RGB-сигналах и некоторыми опорными значениями помимо значений по белой точке. После чего данные преобразуются в т.н. *аппаратно-независимые показатели*, в частности, в трехстимульные — колориметрические (CIEXYZ), либо перцепционные (CIELAB).

После преобразования информации в аппаратно-независимое пространство связи профайлов (PCS), компрессии и сохранения на электронный носитель, к работе может подключиться т.н. RIM— Rendering Intent Module — модуль цветопередачи, выполняющий учет динамического диапазона изображения, коррекцию тонопередачи, ими-

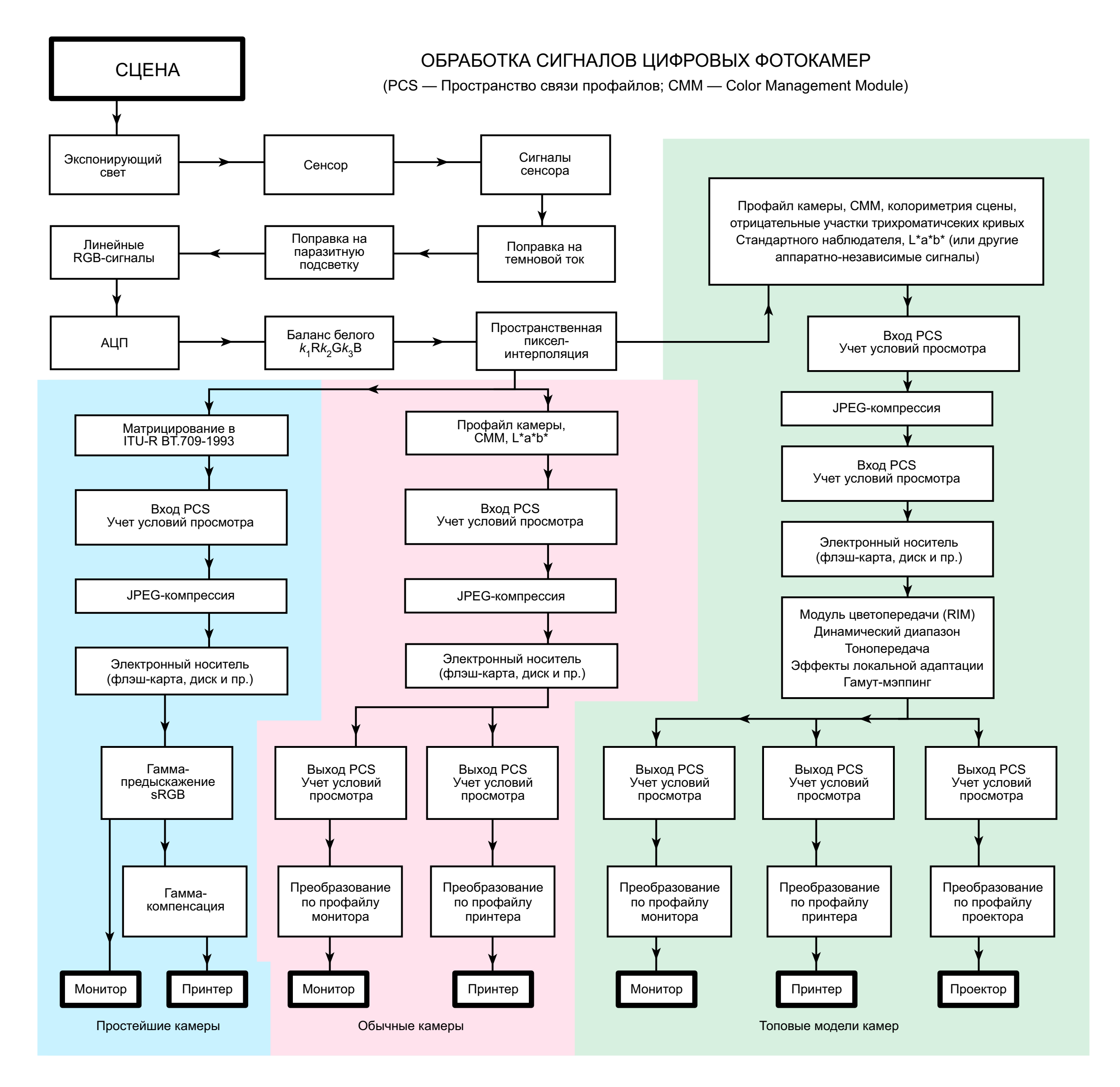


Рис. 31.4 Общая схема обработки сигналов цифровых фотокамер (этап экспозамера опущен).

тацию эффектов локальной адаптации по типу «затенения» и «пропечатки», а также т.н. *гамут-мэппинг* (см. раздел 33.16).

Наконец, данные поступают на обработку т.н. *выходным модулем управления цветовоспроизведением* (output CMM — Color Management Module), рассчитывающим сигналы для отправки их на монитор, принтер или проектор.

31.9 БАЛАНС БЕЛОГО В ЭЛЕКТРОННЫХ КАМЕРАХ

Мы знаем, что зрительная система человека адаптируется к текущим условиям просмотра сцен и изображений. Одним из проявлений адаптации является то, что, при смене характера освещения объектов сцены, изменения в восприятии последних, возникающие в первый момент, довольно быстро и полностью (или почти полностью) ис-

чезают (см. гл. 34). Очевидно, что по аналогии со зрительной системой к смене характера освещения приходится «адаптировать» и цифровые цветорегистрирующие (и цветовоспроизводящие) устройства.

В классической аналоговой слайд-фотографии сего добиваются либо путем выбора пленки подходящего типа (см. раздел 5.7), либо за счет компенсационных фильтров (см. разделы 10.4 и 10.5). В негативно-позитивном процессе «адаптация» реализуется путем управления эффективной цветностью света, экспонирующего позитивный фотоматериал (бумагу) (см. гл. 16). В электронных камерах эффект «адаптации» достигается путем умножения RGB-сигналов сенсора камеры (аппаратных сигналов камеры) на определенные коэффициенты. Величины этих коэффициентов подбирают, руководствуясь тремя принципами:

Принцип Эванса (баланс по серому). Усредненные RGB-сигналы уравниваются между собой. Напомним, что данный принцип был весьма эффективен при аналоговой печати негативов (см. раздел 16.7).

Ретинекс. Максимальные RGB-сигналы уравниваются между собой. Принцип получил название исходя из т.н. *ретинексной теории цветовой константности*, которая предполагает, что ощущение белого обязано максимуму отклика колбочек всех трех типов (Land и McCann, 1971). Паразитное влияние отдельных особо ярких пикселов снижают путем усреднения по группе пикселов или во времени (камкордеры).

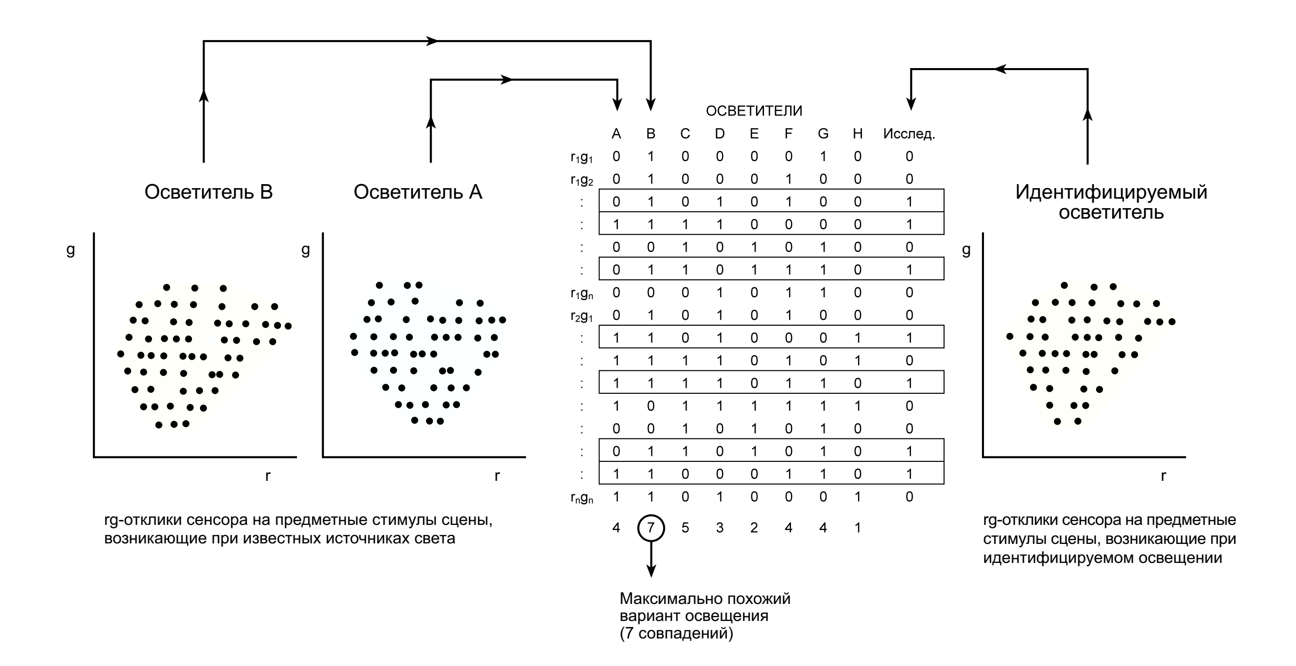
Корреляция. Наиболее вероятная цветность освещения идентифицируется путем сравнения *rg*-откликов сенсора камеры на предметные стимулы сцены при фактическом освещении (несколько десятков стимулов) с *rg*-откликами при нескольких возможных вариантах освещения (Finlayson, Hubel и Hordley, 1997). На рис. 31.5 единицы указывают на то, что стимулы, вызывающие тот или иной отклик, представлены при данном освещении, а нули — на то, что не представлены. Наиболее вероятным (из ряда возможных) явится то освещение, при котором картина нулей и единиц окажется максимально близка к фактической. Метод можно усовершенствовать заменой нулей и единиц на ряд дискретных значений от 0 до 1, представляющих *вероятности* появления стимулов той или иной цветности при данном освещении.

31.10 СТАНДАРТНОЕ ТРИХРОМАТИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО SRGB

На тех этапах цифрового цветовоспроизведения, на которых использование индивидуальных профайлов устройств нецелесообразно или неосуществимо, можно рекомендовать применение стандартного трихроматического пространства sRGB (Anderson, Motta, Chandrasekar и Stokes, 1996). Трихроматическое sRGB-пространство аналогично пространствам, много лет применявшимся в цветном широковещательном телевидении.

Пространство sRGB предполагает, что цветности кардинальных (воспроизводящих) стимулов те же, что и у стандартных 709 люминофоров (см. раздел 21.13), то есть:

	R	G	B	D_{65}
x	0.64	0.30	0.15	0.3127
y	0.33	0.60	0.06	0.3290
z	0.03	0.10	0.79	0.3583



	A	B	C	D	E	F	G	H	Исслед.
r_1g_1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
r_1g_2	0	1	0	0	0	1	0	0	0
:	0	1	0	1	0	1	0	0	1
:	1	1	1	1	0	0	0	0	1
:	0	0	1	0	1	0	1	0	0
:	0	1	1	0	1	1	1	0	1
r_1g_n	0	0	0	1	0	1	1	0	0
r_2g_1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
:	1	1	0	1	0	0	0	1	1
:	1	1	1	1	0	1	0	1	0
:	1	1	1	1	0	1	1	0	1
:	1	0	1	1	1	1	1	1	0
:	0	0	1	0	1	0	1	0	0
:	0	1	1	0	1	0	1	0	1
:	1	1	0	0	0	1	1	0	1
r_ng_n	1	1	0	1	0	0	0	1	0
	4	7	5	3	2	4	4	1	

Рис. 31.5 Балансировка белого по методу корреляции. В таблице представлены данные по шестнадцати предметным стимулам разных цветностей, но на практике можно использовать много большее их количество.

Следовательно, уравнения перехода к соответствующим XYZ-значениям и обратно выглядят следующим образом:

$$R = 3.2410 - 1.5374Y - 0.4986Z$$
$$G = -0.9692X + 1.8760Y + 0.0416Z$$
$$B = 0.0556X - 0.2040Y + 1.0570Z$$

$$X = 0.4127R + 0.3586G + 0.1808B$$
$$Y = 0.2132R + 0.7172G + 0.0724B$$
$$Z = 0.0195R + 0.1197G + 0.9517B$$

Плюс к тому в sRGB-пространстве по RGB-значениям, лежащим выше 0.00304, имеет место гамма-предыскажение со степенью 1/2.4:

$$R' = 1.055R^{1/2.4} - 0.055$$
$$G' = 1.055G^{1/2.4} - 0.055$$
$$B' = 1.055B^{1/2.4} - 0.055$$

Поправка на 0.55 облегчает дискретизацию, когда уровень сигнала слишком мал.

По значениям, меньшим 0.0034, гамма-предыскажение не выполняется и действует выражение:

$$R' = 12.92R$$
$$G' = 12.92G$$
$$B' = 12.92B$$

Значения по черной точке $R = 0$, $G = 0$, $B = 0$, по белой $R = 255$, $G = 255$, $B = 255$ при кодировании в 8 бит на канал (что отлично от телевидения, в котором по черному $R = 16$, $G = 16$, $B = 16$, по белому $R = 235$, $G = 235$, $B = 235$).

При этом sRGB-кодирование предполагает, что монитор компьютера отвечает следующим параметрам:

Фотометрическая яркость белой точки	80 кд/м^2
Освещенность окружения	64 лк
Цветность освещения	Цветность D_{50}-осветителя
Уровень паразитной просмотровой подсветки	1%

Условия просмотра изображений на экране монитора должны иметь такие параметры всегда, когда только возможно. Однако в типичных условиях просмотра освещенность окружения составляет порядка 200 лк, а уровень паразитной просмотровой подсветки порядка 5%. В таких условиях неизбежно возникают отклонения в цветовом восприятии стимулов, воспроизводимых монитором, но отклонения эти можно компенсировать путем применения специальных моделей цветового восприятия (см. Часть VI).

Наконец, отметим, что существует аналогичное sRGB линейное (т.е. не использующее гамма-предыскажения) трихроматическое пространство scRGB.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Anderson, M., Motta, R., Chandrasekar, S., and Stokes, M., Fourth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, pages 238 to 246. IS&T and SID, Springfield, VA, U.S.A. (1996).

Finlayson, G.D., Hubel, P.M., and Hordley, S., Fifth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, pages 6 to 11. IS&T and SID, Springfield, Va, U.S.A. (1997).

Hubel, P.M., Sherman, D., and Farrell, J.E., Second Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, pages 45 to 48. IS&T and SID, Springfield, VA, U.S.A. (1994).

Katoh, N., Mizukara, T., Nishio, K., and Quan, S. Eleventh Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, Late breaking news special papers session. IS&T and SID, Springfield, Va, U.S.A. (2003).

Land, E.H., and McCann, J.J., J. Opt. Soc. Amer., 61, 1 (1971).

Lyon, R.F., and Hubel, P.M. Tenth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, pages 349–355. IS&T and SID, Springfield, Va, U.S.A. (2002).

32 ОЦИФРОВЫВАЮЩЕЕ СКАНИРОВАНИЕ

32.1 ВВЕДЕНИЕ

В 29-й главе мы говорили о методах сканирования и об устройствах, разработанных в свое время специально для нужд полиграфического сектора индустрии изображений (и нацеленных на выход исключительно аналоговых сигналов). В текущей главе мы поговорим о сканировании, ориентированном на работу с сигналом цифровым — *оцифровывающем сканировании*, — и, в том числе, о принципе работы недорогих аппаратов категории *настольных издательских систем*.

Напомним, что аналоговые сканеры использовались для преобразования пространственно и тонально непрерывных оптических входных данных в непрерывные же оптические выходные сигналы (разделенные в определенной временно́й последовательности на строки).

⇨ Оцифровывающее сканирование преобразует пространственно и тонально *непрерывные* оптические входные данные в пространственно и тонально *дискретные* электрические выходные сигналы.

На входе цифрового сканера могут оказаться живописные полотна, графики и диаграммы, тексты, отражающие фотоотпечатки, слайды, а также полутоновые полиграфические оттиски; на выходе — пакет дискретных электрических сигналов, образующих в конечном итоге собственно цифровое изображение.

В контексте работы с изображениями выходные данные сканера можно использовать самыми разнообразными способами: их можно непосредственно (т.е. в электронной форме) отправить на вход самосветящихся дисплеев (CRT и LCD), на вход компьютеров (обычных и ноутбуков), цифровых проекторов, а также опосредованно (т.е. в виде преобразованных электрических сигналов либо даже дискретных оптических сигналов) подать на вход принтеров и визуализировать при этом с помощью твердых носителей, давая либо отражающие отпечатки, либо слайды (см. гл. 33).

Твердую копию цифровых изображений можно получить на фотопленке или фотобумаге, используя экспонирующие лазеры или светодиоды; на обычных поверхностях — применяя движущиеся термосублимационные или термовосковые головки, струйные технологии, электрофотографические технологии, а также традиционную полутоновую печать CMYK-красителями.

При оцифровке текстов сигналы цифрового сканера можно даже конвертировать в исходную текстовую форму с помощью программ, реализующих т.н. *оптическое распознавание символов.*

32.2 МЕТОДЫ СКАНИРОВАНИЯ

Цифровые сканеры используют либо точечный, либо строчный, либо плоскостной световой потоки.

При точечном световом потоке оригинал движется так, что сканирование идет построчно: по длинной стороне он смещается при помощи микровинта, строки же образуются либо за счет вращения барабана, либо за счет хода планшета в поперечном направлении.

Строчный световой поток осуществляет построчное сканирование, а покрытие поля изображения реализуется за счет хода каретки CCD-сенсоров в поперечном направлении.

Когда используется плоскостной поток, механического движения оригинала (либо сенсора) не требуется.

Сканеры, использующие точечный свет (современные барабанные сканеры), дают высокое пространственное разрешение сканирования и большой динамический диапазон, но при этом работают медленно и очень дороги. Аппараты, задействующие строчный сканирующий поток, дешевле барабанных в десятки раз, работают намного быстрее, но при этом дают меньшее пространственное разрешение, меньший динамический диапазон и много бóльшую зашумленность изображения.

32.3 ИСТОЧНИКИ СВЕТА

При трихроматической оцифровке изображений световой поток сканера должен состоять из трех спектральных компонент: длинноволновой («красной»), средневолновой («зеленой») и коротковолновой («синей»).

В сканерах, задействующих точечный источник, применяются обычные вольфрамовые либо ксеноновые лампы накаливания, дающие стабильный ровный спектр.

Аппаратам, использующим строчный поток (планшетные сканеры), больше подходят люминесцентные лампы (несмотря на некоторую нестабильность последних). Также в них применяются ксеноновые лампы с люминофорным покрытием и светодиоды (в последнем случае наряду с красным, зеленым и синим иногда применяется инфракрасный диод, позволяющий выявлять грязь и царапины на поверхности оригиналов).

Общей интенсивностью ламп обычно управляют с помощью т.н. *контуров обратной связи*, а некоторую неравномерность в освещенности линейки устраняют с помощью специальных корректирующих сигналов.

Для повышения стабильности работы ламп их часто держат включенными в течение всего срока службы сканера (что несколько затрудняет детекцию темнового тока сенсора).

32.4 СЕНСОРЫ

Барабанные сканеры, т.е. аппараты, задействующие точечный световой поток, в качестве сенсоров используют фотоэлектронные умножители (ФЭУ), обладающие очень высокой светочувствительностью. Темновой ток ФЭУ очень низок, и поэтому сенсор способен давать бесшумовой отклик в диапазоне световых интенсивностей (динамическом диапазоне) свыше 1000:1 (>3D).

Сканеры, задействующие строчный или плоскостной световой потоки, в качестве сенсора обычно используют линейку или матрицу CCD-элементов. В сравнении с ФЭУ CCD-элементы не столь чувствительны,темновой ток у них выше, и, соответственно, динамический диапазон меньше.

При использовании CCD-элементов необходимо определять уровень темнового

тока и усиление по каждому элементу сенсора. Последнее вынуждает применять т.н. PRNU-сигнал (Photo-Response Non-Uniformity signal — сигнал неравномерности оптического отклика сенсора), позволяющий устранить (или, как минимум, сгладить) межэлементные отличия в отклике.

32.5 ПОЛУЧЕНИЕ ТРИХРОМАТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В барабанных сканерах точечный свет после прохода через оригинал раскладывается с помощью светоделительных призм на трихроматические составляющие.

В планшетных сканерах, использующих в основном строчный свет, трихроматические сигналы получают разными способами:

— в трехпроходных аппаратах материал сканируется последовательно за тремя фильтрами (при этом данные, полученные при первых двух проходах сохраняются в памяти аппарата);

— в однопроходных аппаратах применяются либо связка из трех CCD-линеек (каждая из которых покрыта соответствующим фильтром), либо же светоделители, направляющие отраженный свет на три линейки CCD-сенсоров.

В сканерах, использующих световую плоскость, матрица CCD-элементов покрыта мозаикой красного, зеленого и синего фильтров.

32.6 КОЛОРИМЕТРИЯ

Требования, предъявляемые к спектральным чувствительностям аналоговых сканеров, уже обсуждались нами в разделе 29.18, отметим поэтому лишь то, что сходные требования предъявляются и к сканерам цифровым.

Если сканер предназначен к сбору высокоточных колориметрических данных об оригинале, а значит призван выступить в роли фотоэлектрического колориметра, необходимо, чтобы его спектральные чувствительности отвечали требованию Лютера — Айвса, то есть представляли бы собой трихроматические кривые Стандартного наблюдателя (либо их линейную комбинацию).

Поскольку колориметрические данные зависят от спектрального состава используемого источника света, необходимо согласовывать этот состав со спектральными чувствительностями сенсора. Однако же на деле выбор источника определяют сугубо прикладные соображения: стабильность, светоотдача, цена и удобство. Плюс к тому изготовить детектор, отвечающий требованию Лютера — Айвса, довольно сложно, а если и удается, то его сигналы требуют, как говорят, «тяжелого» матрицирования, снижающего соотношение «полезный сигнал/шум».

Вместе с тем изготовить узкополосные фильтры довольно легко: они не нуждаются в применении специфического источника света, а результирующие сигналы сенсора не требуют тяжелого матрицирования. Однако же характеристики фильтров зависят от свойств оригинала.

Следовательно, выбор между условием Лютера — Айвса и применением узкополосных фильтров строится на анализе достоинств и недостатков обоих технологических вариантов. Провести такой анализ поможет следующая таблица:

Кривые спектральных чувствительностей сенсоров эквивалентные трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя

Достоинства:	Результат не зависит от красочного состава оригинала (*аппаратная независимость*)
Недостатки:	Достижение точного соответствия спектральных чувствительностей сенсоров трихроматическим кривым Стандартного наблюдателя технологически затруднено. Полученные трехстимульные значения зависят от спектрального состава источника света. Соотношение «полезный сигнал/шум» снижено «тяжелым» матрицированием.

Узкополосные фильтры

Достоинства:	Фильтры просты в изготовлении. Соотношение «полезный сигнал/шум» не снижено «тяжелым» матрицированием.
Недостатки:	Результат зависит от красочного состава оригиналов (*аппаратная зависимость*); при разных составах требуются разные алгоритмы пересчета сигналов сканера в трехстимульные значения.

Поскольку кривые спектральных чувствительностей сканеров редко совпадают с трихроматическими кривыми Стандартного наблюдателя, результаты сканирования двух визуально одинаковых, но выполненных разными колорантами оригиналов могут оказаться разными, и наоборот: результаты сканирования двух несколько отличных друг от друга вариантов оригинального изображения, выполненных разными колорантами, могут оказаться одинаковыми. Степень выраженности сего эффекта у разных сканеров разная.

Следовательно, когда мы хотим, чтобы сканер выступил в роли цветоизмерительного устройства, то есть когда нам требуются высокоточные колориметрические цифровые данные об оригинале, необходима т.н. *колориметрическая характеризация* аппарата, затрагивающая в том числе его световой источник, учитывающая колориметрические свойства оригинальных колорантов, чувствительности сенсоров, а также спектральный состав осветителя, используемого при финальных колориметрических расчетах.

Напомним, что характеризацию выполняют с помощью т.н. *тест-карты характеризации* и соответствующего программного обеспечения.

32.7 ТЕСТ-КАРТЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ

Большинство оригиналов представляют собой фотографические изображения, построенные из голубого, пурпурного и желтого красителей, а синтез последних в слоях фотоматериала проходит по схемам, принадлежащим пяти ведущим производителям: Kodak, Fuji, Agfa, Konica и Polaroid (о чем мы рассказывали в разделе 29.19.1, текст которого повторяем ниже).

Перечисленные компании в свое время разработали общий формат отражающих и прозрачных тест-карт характеризации сканеров, получивший название «Q60». В основу формата положена слегка переработанная система Film Reproduction Guide компании Kodak. Отметим также, что все перечисленные фирмы выпускают Q60-карты на своих фотоматериалах.

По международной классификации Q60-формат называется «IT8.7/1 Graphic Technology Color Transmission (or Reflection) Input Target for Scanner Calibration», что значит «Входная цветовая полиграфическая мишень IT8.7/1 на пропускание (или отражение), предназначенная для калибровки сканеров». Мишень эта (тест-карта) несет в себе шкалы одно-, двух- и трехкрасочных комбинаций, а также нейтральную шкалу. Плюс к тому в тест-карте имеются окрашенные патчи двенадцати цветовых тонов на трех уровнях светлоты и при четырех степенях насыщенности.

Спецификация всех образцов мишени дается в системе CIELAB (см. раздел 8.8). Три равноотстоящих друг от друга контура насыщенности задают фигуру общего хроматического охвата всех известных фотоматериалов, а четвертый контур — максимум хроматического охвата данного фотоматериала.

Прозрачные тест-карты обычно выпускаются в размер 4×5" либо 24×36 мм; отражающие — 4×5".

RGB-значения сканера, полученные при сканировании тест-карты, с помощью специализированных программ ставятся в соответствие перцепционным координатам (CIELAB-значениям). Результат такого сопоставления фиксируется в виде специальной трехмерной таблицы — таблицы цветовых соответствий (CLUT — Color Look Up Table).

32.8 ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

По общей логике чем выше детализация сканирования, тем дольше идет процесс и тем больший объем данных приходится обрабатывать. Следовательно, уровень детализации должен быть достаточным, но не избыточным. Действительно, нет никакой необходимости регистрировать те элементы оригинала, что в силу своего малого размера невоспроизводимы ни одним из устройств визуализации.

Таким образом, т.н. *частота пространственной выборки сканирования*, то есть его *пространственное разрешение* зависит от частоты *пространственного разрешения визуализации* (например, печати). Если, положим, пространственное разрешение печати составляет 300 dpi (dots per inch — точек на дюйм), то максимально необходимое пространственное разрешение сканирования составит не более 300 dpi (если, конечно, пространственный размер отпечатка равен пространственному размеру оригинала). Такое разрешение вполне подходит для оцифровки текстов, но у изображений непрерывного тона, таких, в частности, как обычные фотоотпечатки (где краевые контрасты элементов намного ниже, чем у текстов), максимально необходимое пространственное разрешение сканирования лежит в диапазоне 100—200 пикселов на каждый дюйм предполагаемой печати.

Мотивом повышения пространственной частоты сканирования текстов является опасность появления паразитной зубчатости наклонных линий, возникающая как следствие попиксельной визуализации цифровых изображений, в частности их печати. Отметим при этом, что в некоторых сканерах паразитная зубчатость успешно нивелируется аппаратной и/или программной интерполяцией.

В сканерах, использующих точечный световой поток (барабанные сканеры), пространственное разрешение сканирования меняется довольно легко за счет изменения диаметра апертуры луча.

В планшетных сканерах, использующих строчный свет и блок оптического увеличения, пространственное разрешение вдоль линейки сенсоров может меняться за счет

изменения кратности увеличения, а в поперечном направлении — за счет изменения скорости хода линейки.

В тех сканерах, у которых кратность увеличения фиксирована, изменить пространственное разрешение сканирования по направлению линейки много труднее: разрешение можно уменьшить (т.н. *субсэмплинг*) вдвое за счет исключения из процесса сигналов от каждого второго пиксела сенсора (либо в любое иное целое число раз путем исключения большего числа пикселов). Однако субсэмплинг с коэффициентом, скажем, 2/3 весьма затруднителен: понятно, что пропуск каждого третьего пиксела приведет к ощутимому падению качества результирующего цифрового изображения, поэтому обычно поступают так — интерполируют двойное пространственное разрешение, а потом исключают каждый третий пиксел.

Итак, пространственное разрешение сканера как способность фиксировать мелкие детали оригинала определяется рядом факторов, в частности: оптическими свойствами объектива (образующего на поверхности сенсора первичное оптическое изображение оригинала, а в случае барабанных сканеров свойствами оптики, фокусирующей точку на поверхности оригинала), уровнем паразитной подсветки в оптической системе, пространственной частотой выборки по длине линейки (зависит от количества светочувствительных элементов в линейке), диаметром точки сканирующего луча и равномерностью вращения барабана (либо скоростью хода каретки CCD-сенсоров или количеством элементов в светочувствительной матрице).

Наконец, отметим, что понятие «пространственное разрешение сканера» часто разделяют на две составляющих: *оптическое пространственное разрешение*, задаваемое геометрией сенсора и скоростью движения каретки, и *интерполяционное* (*логическое*) *пространственное разрешение*, представляющее собой оптическое разрешение, подвергнутое интерполяции.

32.8.1 Правило Найквиста[1]

В заключение раздела стоит сказать, что существует такое понятие, как *предельная пространственная частота* (*частота Найквиста, найквистова частота*), представляющая собой максимальную пространственную частоту элементов оригинального изображения, которые еще поддаются адекватной регистрации при данном пространственном разрешении сканирования. Правило Найквиста, в приложении к обсуждаемой ситуации, гласит, что:

⇨ Предельная пространственная частота всегда равна половине пространственной частоты сканирования.

Элементы изображения, частота которых превышает предельную, сканируются некорректно, что проявляет себя в возникновении разного рода артефактов (т.н. *алиайзинг*). Примером может служить появление т.н. *муаровых паттернов* при оцифровке полутоновых (растрированных) оттисков (однако программное обеспечение некоторых сканеров имеет функцию подавления данного эффекта).

---

[1] Гарри Найквист (1907 — 1976) — американский ученый шведского происхождения. Один из пионеров теории информации. — *Прим. пер.*

32.9 ТОНАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

Мы помним, что изображения непрерывного тона (фотоотпечатки, слайды, негативы), которые чаще всего выступают в роли сканируемых оригиналов, в рамках своего динамического диапазона (т.е. между максимальной и минимальной оптическими плотностями) имеют неограниченное количество тональных уровней. Однако в цифровых изображениях количество тональных уровней ограничено разрядностью кодирования этого изображения, к примеру: 256 уровнями при 8-битном кодировании, 1024 уровнями при 10-битном, 16384 при 14-битном.

Как было показано в разделе 30.6, если уровни эти распределены по принципу перцепционной равномерности (т.е. равномерности тонового градиента от черной до белой точки), то большинству изображений требуется всего лишь 90 яркостных уровней на диапазон. Иными словами, кодирование в 6.5 бит на каждый трихроматический канал вполне достаточно.

Сигналы, выдаваемые сенсорами сканеров, линейно зависимы от интенсивности света, падающего на эти сенсоры. Но мы помним, что линейное кодирование представляет перцепционные уровни крайне неравномерно. По этой причине большинство сканеров кодируют изображение как минимум в 10 бит, а некоторые в 14 бит и выше, вплоть до 16, и стоит обязательно отметить, что высокая разрядность кодирования при сканировании, то есть высокое *тональное разрешение сканирования* исключительно важно в контексте оцифровки слайдов и негативов.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Giorgianni, E.J. and Madden, T.E., Digital Color Management: Encoding Solutions, Addison-Wesley Longman, Reading, Mass. (1998).

33 ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ

33.1 ВВЕДЕНИЕ

Массовое распространение компьютеров, цифровых сканеров и цифровых принтеров дало возможность высококачественного воспроизведения текстов и изображений с помощью компактного и весьма недорогого настольного оборудования. Иными словами, в конце XX века на рынке изображений появились *настольные издательские системы* (*настольные печатающие системы*).

33.2 ТОНАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

В разделе 30.2 было показано, что уход от паразитного дробления (оконтуривания) серой шкалы цифровых изображений требует минимум 90 тональных уровней (тоновых градаций). Поскольку у большинства цифровых печатающих систем характер переноса краски на поверхность постоянен (один уровень), используется т.н. *полутоновый* (*автотипный*) *принцип* запечатки этой поверхности (см. раздел 26.2).

Цифровые системы визуализации, оперирующие дискретными пикселами, реализуют автотипию (полутон) за счет различных комбинаций т.н. *печатных субэлементов* (*микроточек*).

Чтобы формировать из субэлементов (микроточек) растровые точки девяти десятков возможных размеров, необходима логическая опора на т.н. *растровую ячейку* размером 9×10 субэлементов (см. рис. 33.1). Паттерн субэлементов, собранный внутри растровой ячейки и образующий растровую (полутоновую) точку, именуется *печатным элементом* (*кластером субэлементов*), а сам процесс формирования печатного элемента — *растрированием* (или *оптической дискретизацией*).

На рис. 33.1 показаны 9 из 91 возможных уровней растрирования: от 0 (нет краски) до 90 (полное заполнение растровой ячейки). Однако напомним, что 90 уровней растрирования будут адекватны тон-репродукционным задачам только в том случае, если уровни эти распределены, как говорят, *перцепционно равномерно*. Ниже нам предстоит изучить пути обеспечения такого распределения.

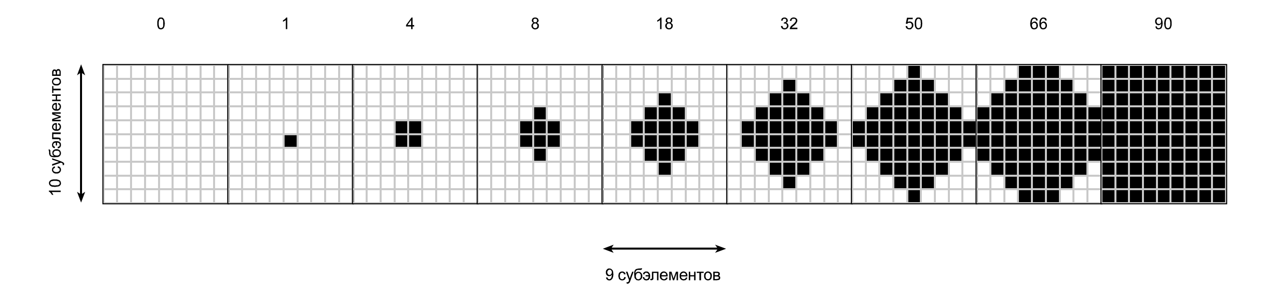


Рис. 33.1 Сборка кластера печатных субэлементов в растровой ячейке 9×10. Позиции субэлементов подобраны так, что образовавшиеся печатные элементы по форме аппроксимируют традиционные полутоновые точки 90 возможных размеров, что в итоге дает 91 тоновую градацию (91 тональный уровень) на диапазон.

33.3 РАСТИСКИВАНИЕ

Размер полутоновых печатных элементов (растровых точек) в полиграфии принято обозначать в показателях их относительной площади. К примеру 50%-ая точка — это точка, размер которой (при данной линиатуре растра) таков, что если все точки в растровой картине данного участка запечатанной поверхности окажутся того же диаметра, то краска заполнит половину площади этого участка; 25% — то же, но краска при этом заполнит четверть площади.

Однако же доля света, поглощенного запечатанной поверхностью, обычно не пропорциональна доле заполнения поверхности красочными точками и, как правило, несколько больше последней. Сей эффект принято именовать *растискиванием* (*dot gain*).

Растискивание бывает двух видов: *механическое* и *оптическое*.

- *Механическое растискивание* — это процесс паразитного увеличения размера растровой точки (против задаваемого печатной формой) как следствие натиска печатного вала.

- *Оптическое растискивание* — это процесс паразитного роста оптической плотности запечатанной поверхности, возникающего в результате вторичного поглощения красочным слоем света, прошедшего в толщу запечатываемого материала и рассеянного этим материалом.

Легко догадаться, что эффекты растискивания должны учитываться при настройке печатающего оборудования (см. раздел 28.15). Учет механического растискивания не представляет сложности, и его описание не входит в задачу данной главы, но феномен оптического растискивания требует детального обсуждения.

33.3.1 Оптическое растискивание

Характер и степень оптического растискивания можно показать, рассуждая о светорассеянии запечатываемой поверхностью. На рис. 33.2 даны три возможных ситуации: без светорассеяния (слева); с полным светорассеянием (справа); с частичным светорассеянием (в середине).

33.3.1.1 Оптическое растискивание без светорассеяния запечатываемой поверхностью

Слева на рис. 33.2 показана ситуация, исключающая какое-либо светорассеяние (сие случается, к примеру, когда краска ложится на металлическую поверхность, в частности алюминиевую, либо же на прозрачную поверхность, как, скажем, в эпидиаскопе). Если сделать условное допущение, что краска полностью поглощает свет, то доля отраженного света (или пропущенного) будет равной $1-A/100$, где «A» — процент заполнения поверхности растровыми точками. К примеру, если $A = 50\%$, то отразится половина упавшего света; если $A = 75\%$, отразится 25% упавшего света.

Таким образом, величина оптического растискивания в данном случае равна нулю.

Соответствующие оптические плотности можно вычислить по уравнению:

$$D = \lg\left\{1/\left[1-\left(A/100\right)\right]\right\}.$$

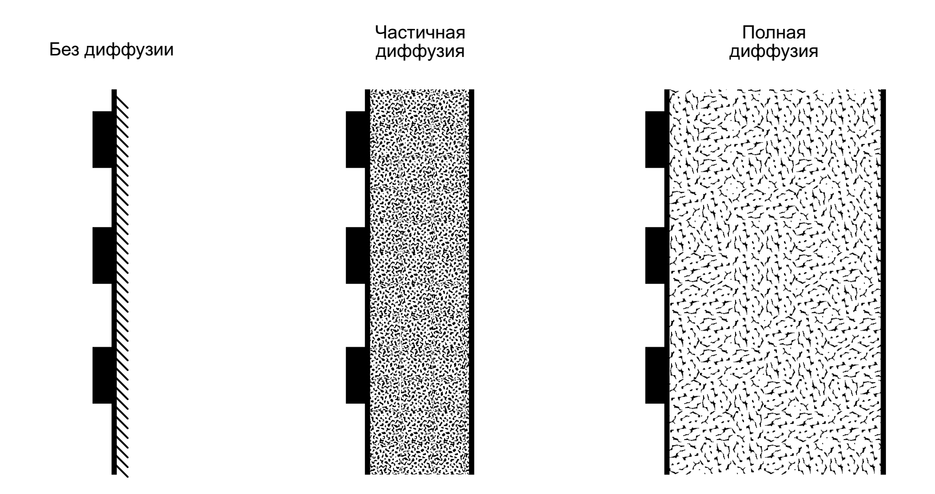


Рис. 33.2 Физический субстрат оптического растискивания. *Слева*: полутоновые точки нанесены на материал, не рассеивающий свет (к примеру, металл), — красочные точки поглощают его единожды. *Справа*: полутоновые точки нанесены на материал, полностью рассеивающий свет (к примеру, рыхлую бумагу), — красочные точки поглощают свет дважды — при его падении и при выходе из толщи поверхности. *В центре*: ситуация частичного рассеивания, возникающая в большинстве случаев при печати на неметаллических поверхностях.

33.3.1.2 Оптическое растискивание при полном светорассеянии

В правой части рис. 33.2 показана ситуация полного светорассеяния запечатываемым материалом — так бывает, когда краска ложится на очень рыхлую поверхность. В данном случае падающий свет частично поглощается красочными точками, частично проходит между ними, проникая в толщу материала, рассеивается в нем и, возвращаясь назад, опять же, частично проходит между растровыми точками, частично поглощается ими. Двойной проход света и двойное его поглощение краской ведут к тому, что оптическая плотность запечатанной поверхности (в сравнении с ситуацией полного нерассеяния) практически удваивается:

$$D'' = 2D.$$

В этом случае мы говорим, что величина оптического растискивания равна 100%.

33.3.1.3 Оптическое растискивание при частичном светорассеянии

В середине рис. 33.2 показана типичная печатная ситуация, при которой величина светорассеяния имеет некое промежуточное значение. Оптическая плотность (D') в данном случае описывается ощутимо более сложной формулой, в частности уравнением Юла — Нильсона (Yule и Nielson, 1951):

$$D' = n\mathrm{Lg}\left\{1/\left[1\text{-}\left(\mathrm{A}/100\right)\left(1-10^{-d/n}\right)\right]\right\},$$

где «n» — некий коэффициент, величина которого зависит от величины рассеяния света поверхностью (приравнивается к единице при отсутствии рассеяния и достигает 3 при высоком рассеянии); «d» — оптическая плотность сплошного красочного слоя.

Понятно, что величины оптического растискивания в этих случаях будут иметь некие промежуточные значения.

33.3.2 Оптическое растискивание и визуальное восприятие

На рис. 33.3 даны графики оптической плотности запечатанной поверхности как функции от площади запечатки краской при отсутствии рассеяния (D), при полном рассеянии (D'') и при частичном (D'). Последнее, как уже было сказано выше, типично для большинства реальных ситуаций (Yule, 1967). Во всех трех случаях предполагается, что оптическая плотность сплошного слоя черной краски равна 1.52 (соответствует коэффициенту отражения 3%).

Там же для сравнения дан график CIE L^* (приблизительный коррелят ощущения светлоты) как функция от оптической плотности. Шкала L^*-значений нормирована так, что $L^* = 100$ соответствует незапечатанной поверхности (0% краски), а $L^* = 20$ — сплошному красочному слою (100% запечатки), поскольку при коэффициенте отражения 3% $L^* = 20.04$.

Четко видно, что кривая L^* лежит между D'- и D''-кривыми, но ощутимо удалена от кривой D. Последнее указывает на то, что, когда рассеяние света запечатываемой поверхностью равно нулю, — взаимоотношения между CIE-светлотой (L^*) и площадью

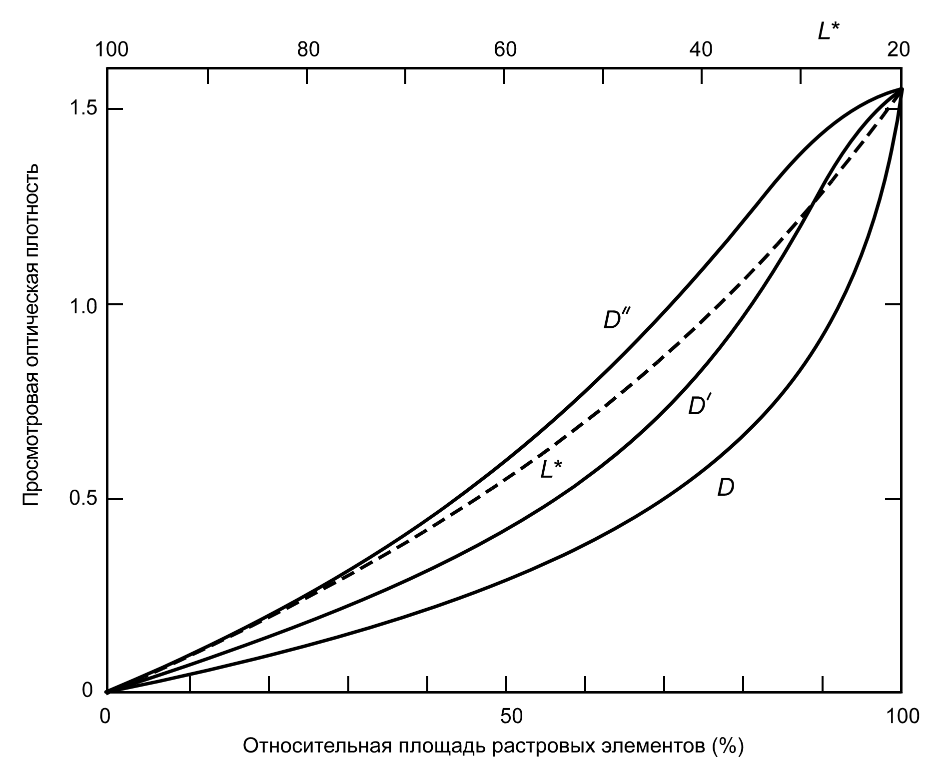


Рис. 33.3 Просмотровая оптическая плотность как функция от относительной площади растровых элементов на поверхности (при просмотровой оптической плотности сплошного красочного слоя 1.52). D — при отсутствии рассеяния; D'' — при полном рассеянии; D' — при частичном рассеянии, типичном для большинства бумаг. Пунктирная кривая демонстрирует характер взаимоотношений между величинами CIE-светлоты (L^*) и оптическими плотностями. Перцепционная шкала светлот нормирована так, что $L^* = 100$ соответствует незапечатанной поверхности; $L^* = 20$ — сплошному слою черной краски (100% запечатки).

растровых элементов на этой поверхности далеко не линейны и *градиент* светлоты на высоких цифрах запечатки много больше, чем на низких. Однако же при печати на обычных бумагах L^* как функция от площади запечатки становится много более равномерной.

Если по каким-то причинам кривая D' вдруг в точности повторит форму L^*-кривой, то, чтобы обеспечить плавность тональных переходов между элементами изображения, понадобится всего лишь 90 вариантов размера полутоновых элементов (растровых точек). Но поскольку, как мы видим, точного совпадения между кривыми нет, то минимально необходимое количество вырастает до 100, и значит, растровая ячейка должна состоять из 100 субэлементов (10×10), а не из 90 (9×10) (см. рис. 33.4).

Приведенные выше рассуждения подводят нас к тому, что при формировании полутонового печатного элемента (растровой точки) «диаметр» субэлементов не должен превышать одной десятой от «диаметра» растровой ячейки.

33.4 СРАВНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАЗРЕШЕНИЙ

Вспомним частотно-контрастную характеристику зрения (MTF зрения), график которой мы дали на рис. 18.15: отклик на стимулы пространственной частоты порядка 20 циклов на градус (5 циклов на миллиметр) при «нормальном» просмотровом расстоянии (250 мм) падает до 20% от максимума. Сие вполне можно объявить репрезентативным пределом пространственного разрешения, потребным цветовоспроизводящим системам (поскольку влияние стимулов бо́льших пространственных частот на зрение человека радикально меньше). Мы говорим при этом, что пространственная частота стимулов в 5 циклов на миллиметр соответствует пространственному разрешению цифрового изображения в 10 пикселов на миллиметр.

33.4.1 Контонные системы

Очевидным выводом из сказанного выше является то, что при воспроизведении изображений системами непрерывного тона выходное пространственное разрешение цифрового изображения в 10 пикселов на миллиметр (254 пиксела на дюйм) будет вполне достаточным и дальнейшее повышение пространственного разрешения системы окажется бессмысленным. Сие находит подтверждение в практике: контонные

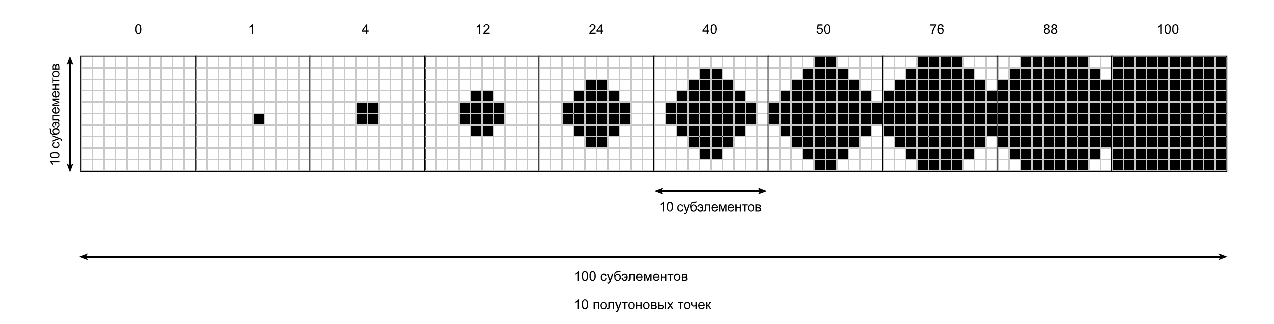


Рис. 33.4 Образование кластера печатных субэлементов в растровой ячейке 10×10. Позиции субэлементов подобраны так, что сформированные печатные элементы аппроксимируют по форформу традиционных полутоновых точек 100 возможных размеров, что дает 101 тоновую градацию (101 тональный уровень).

системы (например, термосублимационные принтеры), работающие на разрешениях порядка 250 ppi, воспроизводят изображения, которые с нормального просмотрового расстояния выглядят безупречно резкими.

Однако работа на таком разрешении предполагает, что соседние пикселы аппарата не оказывают никакого влияния друг на друга. Если же взаимное влияние имеет место, то при том же просмотровом расстоянии потребуются бóльшие величины пространственного разрешения. Напомним при этом, что уход от паразитной зубчатости наклонных фрагментов текстовых литер часто требует ощутимо большего пространственного разрешения печати, чем 250 ppi.

В табл. 33.1 приведены рабочие цифры разрешений систем непрерывного тона.

33.4.2 Полутоновые системы

Для того чтобы отпечатки, воспроизводимые полутоновой системой, достигли пространственного разрешения в 5 циклов на миллиметр, потребуется пространственное разрешение в 10 полутоновых печатных элементов (растровых точек) на миллиметр, что соответствует 100 линиям на сантиметр (100 lpcm) — 250 lpi. Воспроизведению точек столь малого размера нужна исключительно гладкая поверхность, поэтому когда используются бумаги низкого глянца, применяются линиатуры ощутимо меньших значений (см. табл. 33.2).

В таблице 33.2 наряду с цифрами растровых линиатур даны соответствующие величины разрешений в субэлементах на миллиметр, необходимые для отрисовки полутоновых элементов (растровых точек). Напомним, что обеспечение 100 тоновых градаций на диапазон, позволяющих уйти от паразитного оконтуривания градиентов, требует того, чтобы пространственный размер субэлементов не превышал 0.1 размера растровой ячейки.

Наконец, отметим, что в технологиях достижения сверхмалого размера субэлементов все чаще используются лазеры.

33.5 ЦИФРОВАЯ ЦВЕТОПРОБА

Когда цифровым способом изготавливаются *полиграфические сепарации*, всегда возникает необходимость в визуальной оценке потенциального результата печати. Решением вопроса стала разработка т.н. *цифровых цветопробных систем*, построенных на основе электрофотографической, термосублимационной и струйной технологий.

33.5.1 Электрофотографические цветопробные системы

Электрофотографические цветопробные системы задействуют лазеры, экспонирующие специальный электрофотографический материал. Диаметр лазерного луча обычно составляет 1/2000 дюйма, благодаря чему устройство воспроизводит до 200 печатных элементов (растровых точек) на дюйм.

Экспонированный материал, согласно образовавшейся под воздействием лазера электростатической картине, принимает на себя один из CMYK-тонеров (например, cyan) и переносит полученное красочное изображение на ту или иную поверхность (бумагу). Аналогично по оставшимся тонерам.

Примером цифровой электрофотографической цветопробной системы является система *Digital Matchprint* (3M).

ТАБЛИЦА 33.1 Пространственное разрешение систем непрерывного тона

Пиксел/см	Пискел/дюйм	Пиксел/мм	Субъективная резкость
120	300	12	Отличная
100	250	10	Удовлетворительная
80	200	8	Неудовлетворительная
60	150	6	Неудовлетворительная

ТАБЛИЦА 33.2 Пространственное разрешение полутоновых систем

	Линий/см	Линий/дюйм	Пиксел/мм	Субэлементов/мм	Полутоновых точек/мм	Полутоновых точек/дюйм
Системы высшего качества	100	250	10	100	1/100	1/2500
Системы высокого качества	70	175	7	70	1/70	1/1750
Системы журнального качества	60	150	6	60	1/60	1/1500
Системы офсетно-газетного качества	40	100	4	40	1/40	1/1000
Системы качества газетной высокой печати	26	65	2.6	26	1/26	1/650

33.5.2 Термосублимационные цветопробные системы

В термосублимационных цветопробных системах также применяются лазеры, но воздействуют они на пластины, покрытые красителем. Пластины, поглощая энергию лазерного луча, сильно нагреваются, краситель при этом возгоняется, переходя на специальный лист фольги. Каждой цветопробной сепарации отводится свой лист, на который переносится соответственно cyan-, magenta-, yellow- и black-красители.

На следующем этапе красочные изображения с точной приводкой накатываются на запечатываемую поверхность, формируя результирующее трихроматическое изображение.

Диаметр лазерного луча, также как и в электрофотографических системах, составляет примерно 1/2000 дюйма, что эквивалентно растровой линиатуре в 200 lpi.

Примером термосублимационной системы может служить принтер *Approval* (Kodak).

Отметим также, что существуют термосублимационные системы непрерывного тона. Примерами являются *Thermal Color Proofer* (Kodak) и *Chromalin 4Cast* (DuPont).

* * *

Струйные цветопробные системы будут описаны нами в разделе 33.11

33.6 ТЕХНОЛОГИИ НАСТОЛЬНОЙ ПЕЧАТИ

Цифровые изображения пригодны не только к показу на самосветящихся дисплеях, но и к визуализации на прозрачных и отражающих поверхностях. Цифровые цветопробные системы, описанные выше, готовы эффективно решить такую задачу, но себестоимость отпечатка при этом оказывается довольно высокой. Поэтому были разработаны альтернативные и намного более дешевые технологии визуализации цифровых изображений на твердых носителях, в частности: *фотографическая*, *лазерная электрофотографическая*, *термосублимационная*, *термовосковая* и *струйная*.

33.7 ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Фотографическими системами визуализации цифровое изображение воспроизводится на традиционных фотобумагах и фотопленках. Промежуточное экспонирующее изображение при этом создается электронно-лучевыми трубками, LCD-дисплеями, плазменными дисплеями, лазерами и даже дуговыми лампами.

33.7.1 Экспонирование электронно-лучевой трубкой

Когда в качестве экспонирующего узла применяется электронно-лучевая трубка, предпочтительно, чтобы она была монохромной, а экспонирование фотоматериала — троекратным, проходящим соответственно за красным, зеленым и синим фильтрами. Дело в том, что в данном случае удается достичь максимального пространственного разрешения экспозиции, что невозможно при использовании обычной трехлюминофорной трубки (пространственное разрешение которой много меньше, чем у трубки монохромной).

Данная технология обычно применяется при визуализации цифровых изображений на слайд-материалах.

33.7.2 Экспонирование методом последовательных строк

Альтернативной технологией является применение специальной электронно-лучевой трубки размером в одну строку, реализующее трихроматическое экспонирование *последовательно* через красный, зеленый и синий фильтры. Фотоматериал после тройного экспонирования каждой строки смещается на ширину этой строки, чем достигается покрытие всего поля.

Данная технология экспонирования именуется «*методом последовательных строк*» и используется в системе *Metrum*.

33.7.3 Лазерное экспонирование

Когда экспонирование ведется лазерным лучом, необходимо обеспечить его развертку по полю будущего отпечатка. Строчную развертку обычно выполняют за счет быстро вращающегося зеркального многогранника, вертикальную — за счет смещения фотоматериала. Объединив лучи трех лазеров, дающих соответственно красный, зеленый и синий потоки, можно выполнять одновременное экспонирование всех трех светочувствительных слоев фотоматериала.

Описанная технология получила название «*одновременной лазерной пикселизации*» и применяется в системах *Color Laser Imager* (3M).

Отметим также, что в системе *Pictography* (Fuji) красный, зеленый и синий лазер-

ные диоды экспонируют специальную красящую бумагу, отдающую при нагревании на бумагу приемную соответствующие количества cyan-, magenta- и yellow-красителей (см. раздел 17.10). Такой перенос требует весьма малого расхода воды и занимает не более минуты.

33.7.4 Экспонирование дуговыми лампами

В этой фотографической системе интенсивности красного, зеленого и синего световых потоков, полученных от ксеноновых дуговых ламп и экспонирующих фотоматериал одновременно, управляются т.н. *акустооптическими модуляторами*. Примером может служить система *Light Value Technology* (LVT).

33.7.5 Первые системы цифрового колориметрического репродуцирования

Комбинация цифровых и фотографических технологий колоссально расширила наши возможности. Одной из первых появилась система высокоточного репродуцирования живописных полотен (McCann, 1993). Схема действий была следующей:

— вначале воспроизводилась тест-карта высокого разрешения, состоящая из маленьких цветовых патчей и экспонировавшая цветную обращаемую фотопленку;

— полученный слайд с увеличением печатался на фотобумагу Polaroid SX 70 (см. раздел 17.10);

— оригинальный рисунок фотографировался на негативную пленку вместе с тест-картой, выполненной на предыдущем этапе, после чего негатив оцифровывался (сканировался) с высоким разрешением. На выходе получали файл цифровых данных как по оригиналу, так и по карте;

— на следующем этапе цифровые показатели карты подгонялись к ее оригинальным цифровым данным, а получившийся алгоритм подгонки применялся к цифровому изображению оригинального рисунка;

— откорректированные сигналы посылались на вход цифрового принтера, экспонировавшего обращаемую фотопленку, которая после проявки с увеличением печаталась на Polaroid SX 70.

Отметим, что описанным способом удавалось получить копию визуально весьма близкую к оригиналу.

33.8 ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Настольные лазерные электрофотографические системы аналогичны уже описанным в разделе 33.5 цветопробным электрофотографическим системам, но при этом они ощутимо проще в устройстве (и, соответственно, дешевле), поскольку не ставят перед собой цели отображать растровую структуру полиграфических оттисков (что порой желательно в цветопробном деле).

Так же как и в цветопробных, в настольных электрофотографических системах диаметр лазерного луча составляет 1/2000 дюйма, что дает возможность воспроизводить до 200 полутоновых точек на дюйм изображения. Сие неплохо, но несколько недотягивает до желательных 250 ppi.

Электрофотографический принцип положен в основу работы цветных фотокопиров (в просторечии «ксероксов») и настольных лазерных принтеров, в частности серий

Color Laser Copier (Canon), *Majestic* (Xerox), а также профессиональных принтеров *Indigo* и *Xeikon* (см. раздел 26.11).

33.9 ТЕРМОСУБЛИМАЦИОННАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Настольные термосублимационные системы аналогичны уже описанным в разделе 33.5 цветопробным термосублимационным системам, хотя схожи с ними лишь в том, что краситель переносится с отдающего материала на приемный посредством термодиффузии (термосублимации). Отличия же состоят в следующем:

— нагрев производится не лазером, а линейкой микротермоэлементов;

— перенос красителя осуществляется непосредственно на запечатываемую поверхность, а не на промежуточный носитель;

— системы способны давать как полутоновые, так и контонные изображения (см. рис 33.5).

Бумага или иной носитель, принимающий на себя красители, при помощи специального вала проталкивается под линейкой термоэлементов, пространственная плотность которых составляет от 200 до 300 ppi. Т.н. *красящая лента* несет на себе CMYK-красители и движется вместе с бумагой, проходя при этом между бумагой и термоголовкой.

Управляющий сигнал инициирует нагрев термоэлементов до температур, вызывающих возгонку красителя и его перенос на запечатываемую поверхность. Количество возгоняющегося красителя есть функция от степени нагрева и, следовательно, функция от величины управляющего сигнала.

Из сказанного выше и из рис. 33.5 ясно, что изображение формируется из строк, а покрытие поля реализуется за счет вращения барабана. Понятно также, что лист бумаги проходит под головками четырежды и при каждом проходе на него переносится соответствующий триадный краситель.

Пространственное разрешение термосублимационных принтеров непрерывного тона по каждой строке равно пространственной плотности микротермоэлементов в линейке (при условии, что каждый термоэлемент работает независимо от соседних). Формально пространственная плотность в 300 ppi даже превышает необходимую, однако паразитный боковой подогрев каждого термоэлемента, уменьшая их эффективность, снижает величину пространственного разрешения печати как раз до 250 ppi, теоретически необходимых для обеспечения визуальной равномерности градиентов.

Особо отметим, что термосублимационные системы дают изображения очень высокого качества по всем параметрам, в частности обеспечивают точнейшую тоно- и хромопередачу, а также великолепную субъективную резкость отпечатков.

Вместе с тем аппаратам требуется специальная приемная бумага и дорогостоящая красящая лента. Высокая стоимость ленты объясняется тем, что количество красителей в ней довольно велико, но при этом бóльшая их часть остается невостребованной.

Время выхода готового изображения составляет примерно 1 минуту.

Примером термосублимационных систем являются принтеры серии *Thermal Sublimation* (Mitsubishi), серии *XL* (Kodak) и *Rainbow* (3M).

33.10 ТЕРМОВОСКОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Термовосковые принтеры по своей конструкции аналогичны термосублимационным (рис. 33.5), но вместо специальных легко возгоняющихся красителей в них ис-

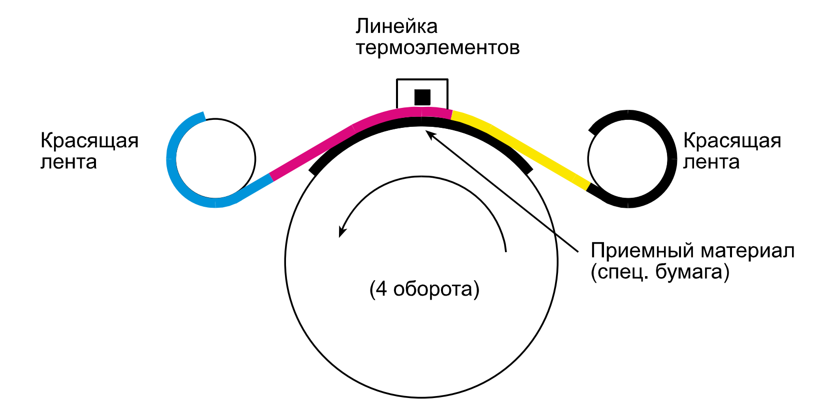


Рис. 33.5 Принципиальная схема термосублимационного принтера.

пользуются окрашенные воски. Термосковая система работает по принципу «все или ничего» — воск либо переносится на поверхность по данному пикселу, либо нет. Таким образом, термовосковая печать является полутоновой. При этом для достижения той же степени пространственного разрешения, что и у контонных термосублимационных систем, пространственную плотность микротермоэлементов в линейке пришлось бы повысить в 10 раз. Последнее технически невозможно, поэтому величина пространственного разрешения остается на уровне 200—300 ppi.

300 микротермоэлементов в идеале воспроизводят 300 печатных субэлементов на дюйм и, соответственно, 30 полутоновых точек на тот же дюйм, что дает весьма низкое пространственное разрешение результирующего отпечатка. Поэтому, как правило, идут на компромисс: ценой появления некоторого паразитного оконтуривания (визуального дробления) градиентов[1] уменьшают растровую ячейку до 6×6.

Применение растровой ячейки 6×6 (рис. 33.6) дает пространственное разрешение отпечатка, эквивалентное 50 полутоновым точкам на дюйм: сие по-прежнему далеко от желаемого, но уже ощутимо лучше, чем 30 точек.

Поскольку при 50 полутоновых точках на дюйм регулярная растровая картина изображения хорошо заметна с ординарного просмотрового расстояния, то очевидно, что активно искались и в итоге были найдены пути снижения ее визуальной различимости. Распространение получили два метода: *метод дисперсных точек* и *метод диффузии ошибки*.

33.10.1 Метод дисперсных точек (дисперсных субэлементов)

На рис. 33.6 показано, как полутоновые печатные элементы (растровые точки) образуются традиционным путем, т.е. путем т.н. *кластеризации субэлементов* от центра растровой ячейки к ее периферии, давая при этом 36 возможных вариантов пространственного размера и, соответственно, 37 тоновых градаций.

На рис. 33.7 субэлементы *рассредоточены* (*диспергированы*) внутри растровой ячейки, причем настолько равномерно, насколько сие возможно. Количество воспроизводимых тоновых градаций при этом остается прежним (37 градаций).

Итак, очевидно, что второй вариант растрирования дает визуально меньшую зернистость отпечатка, особенно в средних тонах.

---

[1] Поскольку количество тоновых градаций при этом падает со 101 до 37.

33.10.2 Метод диффузии ошибки

Еще один способ растрирования, уменьшающий визуальную различимость точечной структуры полутоновых изображений, именуется *методом диффузии ошибки* (Floyd и Steinberg, 1976). На рис. 33.8 показан фрагмент цифрового изображения в процессе растрирования по данному методу. Фрагмент содержит пять рядов по шесть пикселов в каждом. В нашем примере участок из первых 15 пикселов уже подвергнут растрированию и на очереди обработка 16-го, который и послужит иллюстрацией работы обсуждаемого механизма.

Итак, в зависимости от того, к чему оказывается ближе контонное значение пиксела цифрового изображения, на вход принтера отправляется команда либо запечатать данный пиксел (полное количество краски), либо оставить пустым. Затем вычисляется ошибка между фактическим количеством краски и контонным значением. Результат вычисления оказывает влияние на решение о запечатке или незапечатке соседних пикселов по следующему принципу: 7/16-ых величины ошибки адресуются следующему пикселу в данном ряду; 5/16 — пикселу той же колонки, но в нижеследующем ряду; 3/16 — пикселу слева от предыдущего; 1/16 — пикселу справа. Иными словами, будет запечатан данный пиксел или нет, зависит от того, ближе к какому варианту находится его контонное значение, но значение это подправляется на величину ошибки по предыдущему пикселу.

33.10.2.1 Преимущества метода

На рис. 33.9 показаны отличия в растровых картинах, воспроизводимых по методу

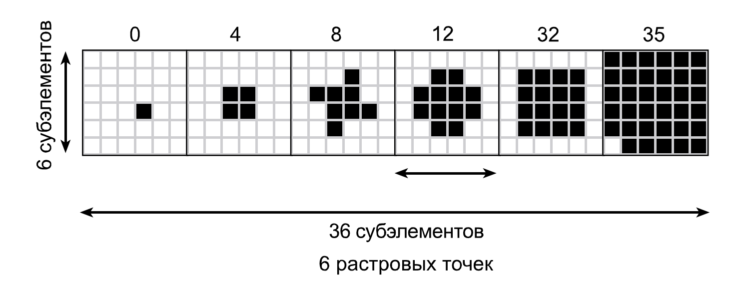


Рис. 33.6 Сборка кластера печатных субэлементов в растровой ячейке 6×6. Позиции субэлементов подобраны так, что образующиеся печатные элементы по форме аппроксимируют традиционные полутоновые точки 36 возможных размеров, что дает 37 тоновых градаций (37 тональных уровней).



Рис. 33.7 Дисперсия субэлементов в растровой ячейке 6×6. Позиции субэлементов подобраны исходя из принципа минимальной визуальной различимости растровой структуры изображения.

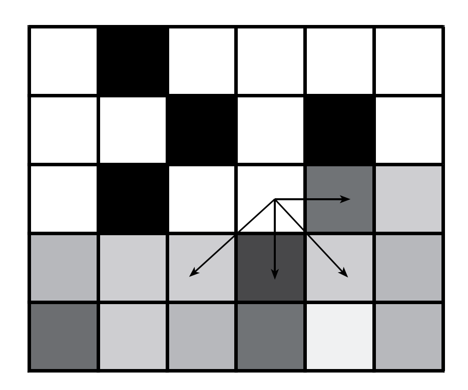


Рис. 33.8 Растрирование контонного цифрового изображения по принципу диффузии ошибки. Пикселы промежуточных тонов либо запечатываются краской, либо не запечатываются, но величина ошибки при этом идет в зачет соседним пискелам исходя из весовых коэффициентов в правой табличке.

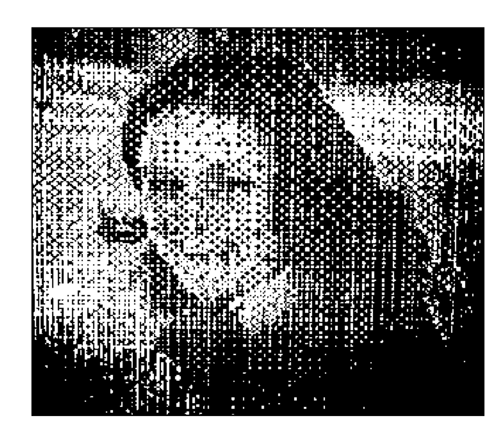



Рис. 33.9 Сравнение растровых картин, воспроизводимых по методам дисперсных точек (слева) и диффузии ошибки (справа).

дисперсных точек (слева) и методу диффузии ошибки (справа). Хорошо видно, что растровая структура изображения при втором методе менее заметна (поскольку менее регулярна).

Стоит отметить, что метод диффузии ошибки получил широчайшее распространение в тех системах, полутоновое разрешение которых вынуждено быть много меньшим желаемого.

Стоит сказать также, что метод диффузии ошибки позволяет ощутимо повысить субъективную резкость изображений (Knox и Eschbach, 1993).

33.10.3 Область применения термовосковых принтеров

Термовосковые принтеры позволяют получать высококачественные отпечатки примитивных нефотореалистичных изображений, таких как логотипы, рекламные стикеры и т.п., то есть изображений, получивших в свое время название *стилизованных* или *картун-изображений*.

Термовосковое воспроизведение фотореалистичных изображений лимитировано грубой растровой структурой, однако, как уже было сказано выше, методы дисперсных точек и диффузии ошибки позволяют радикально повысить качество печати.

Отметим, что термовосковые системы не требуют использования специальных бу-

маг, а применение окрашенных восков (вместо специальных возгоняющихся при нагреве красителей) позволяет радикально понизить себестоимость красящей ленты.

Время получения запечатанной страницы размера А4 составляет примерно одну минуту.

Термовосковые системы выпускаются компаниями Mitsubishi, QMS, Seiko и Tektronix.

33.11 СТРУЙНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Вспомним, что большинство полиграфических систем переносят краску на поверхность за счет механического прижима к ней печатной формы; термосистемы — за счет возгонки нагретого красителя (т.е. перехода из твердого агрегатного состояния в газообразное, минуя жидкое) либо за счет его плавления. Еще одним (и относительно новым) методом краскопереноса является метод, при котором аппарат формирует сверхмелкие капли колоранта и выбрасывает их из специальных сопел на бумагу или иную поверхность. Такие системы получили название *струйных* (*краскоструйных*) систем.

Струйные принтеры обычно выполняют строчное печатающее сканирование бумаги головкой с соплами, а покрытие поля реализуется за счет шагового смещения этой бумаги специальным валом. Все четыре колоранта подаются на поверхность одновременно через плотно расположенные друг к другу форсунки (сопла). Пространственная плотность форсунок составляет, как правило, примерно от 300 до 720 сопел на дюйм, а общее их количество в головке варьирует от 10 до 100. Чем шире головка, чем больше в ней сопел, тем выше скорость печати. При этом простой расчет показывает, что полнострочной запечатке листа формата А4 нужна головка с 2400 форсунками (при их пространственной плотности 300 сопел на дюйм).

33.11.1 Методы струйного краскопереноса

Сегодня находят применение пять технологических вариантов струйного краскопереноса: *пьезоэлектрический*, *термоструйный*, *термовосковой*, *drop-on-demand* и *непрерывный*.

33.11.1.1 Пьезоэлектрический струйный краскоперенос

При данном методе электрическое поле деформирует специальный кристалл, выталкивающий микрокаплю колоранта.

33.11.1.2 Термоструйный краскоперенос

Термометод основан на нагреве колоранта до точки его кипения с образованием пузырьков пара, выбрасываемых на запечатываемую поверхность.

33.11.1.3 Термовосковой струйный краскоперенос

При термовосковом краскопереносе формирование микрокапель происходит за счет паров окрашенного воска, расплавленного и доведенного до кипения.

33.11.1.4 Перенос краски по принципу drop-on-demand («микрокапля по требованию»)

При данном методе каждое сопло печатающей головки либо отдает колорант, либо нет, то есть система работает по принципу «все или ничего» (полутоновая система). Так же как и в описанных в предыдущем разделе термовосковых системах, пространственное разрешение в 300 ppi не может обеспечить должного пространственного разрешения отпечатков и требуемого количества тоновых градаций.

Проблема решается уже известным способом: растровая ячейка 6×6 несет в себе либо диспергированные субэлементы, либо распределенные по методу диффузии ошибки. Следовательно, качество отпечатков может оказаться вполне удовлетворительным, но ограничивается пространственной плотностью сопел в головке.

Применение специальных бумаг необязательно. Работа аппаратов безотходна и поэтому себестоимость каждого отпечатка (а также цена самих устройств) оказываются довольно низкими.

Принцип «drop-on-demand» используют струйные системы многих производителей, в частности: Epson, Canon, Hewlett-Packard, Seiko, Sharp, Tektronix.

Время получения отпечатка формата A4 — около одной минуты.

33.11.1.5 Непрерывная подача краски

Название метода говорит само за себя: краска непрерывно подается из сопел, а лишние капли удаляются приложением электрического поля и возвращаются в канистру. Метод позволяет формировать сверхмелкие капли колоранта (порядка 0.015 мм в диаметре) и воспроизводить тем самым до 32 двух тоновых градаций на пиксел. Данное количество недостаточно для того, чтобы объявить систему контонной, однако присовокупив к ее работе метод дисперсных точек по растровой ячейке 4×4, можно получить 512 (16×32) тоновых градаций на диапазон. То есть, при 300 соплах на дюйм система дает 32 тоновых градации при линиатуре растра 300 lpi и 512 градаций при 75 (300/4) lpi.

При линиатуре в 300 lpi (соответственно при 32 тоновых градациях) отлично воспроизводятся мелкие детали изображения, но при этом возникает некоторое дробление градиентов. На меньших линиатурах качество воспроизведения мелких деталей понижается, зато градиенты воспроизводятся идеально. Напомним, что паразитное оконтуривание заметно лишь на крупных градиентах, но совершенно неразличимо в мелких деталях, и наоборот: низкие линиатуры ничем не вредят воспроизведению градиентов, но при этом деталировка изображения снижается.

Таким образом, мы видим, что метод непрерывной подачи краски очень хорошо согласуется с особенностями зрительного восприятия изображений и дает отпечатки высочайшего качества.

Кроме того, данный метод не требует применения специализированных бумаг; цена красителей относительно низка, благодаря чему низка себестоимость отпечатков. Однако необходимость формирования микрокапель несколько повышает себестоимость аппаратов.

Печать страницы формата A4 обычно занимает около минуты.

Примерами систем, работающих по принципу непрерывной подачи, являются аппараты компаний Iris, DuPont и Stork.

33.12 ГИБРИДНЫЕ КОНТОННО-ПОЛУТОНОВЫЕ СИСТЕМЫ

Идея объединения (гибридизации) контонного и полутонового принципов субтрактивной регулировки интенсивностей воспроизводящих стимулов оказалась весьма успешной (в табл. 33.3 представлены несколько возможных вариантов гибридных систем).

Первые струйные системы были сугубо полутоновыми. Позднее появились аппараты, дающие 8 контонных градаций в связке с растрированием по ячейке 4×4, что эксплуатировалось следующим образом: растры с линиатурой в 300 lpi воспроизводили мелкие детали и края, а растры с линиатурой порядка 75 lpi — детали низкой пространственной частоты и градиенты. Количество тоновых градаций в крупных элементах изображений достигало 128, а в мелких — 8.

Широко известная система *Photo-Smart* (Hewlett-Packard) задействует четыре контонных варианта нанесения каждой краски, но при этом наряду с триадой в деле участвуют две осветленных: magenta и cyan. Аппарат дает четыре уровня подачи краски по yellow, двадцать четыре — по magenta и cyan, двадцать шесть — по black.

Большое количество уровней подачи краски в связке с растрированием по принципу диффузии ошибки при 300 ppi дают отличное пространственное разрешение отпечатков и полное отсутствие паразитных контуров в градиентах.

Наконец, отметим, что yellow-красителю требуется меньшее число уровней краскоподачи, чем прочим красителям триады, поскольку, как мы помним, чувствительность зрения к желто-синим переходам в мелких деталях изображений резко снижена.

33.13 COLOR MANAGEMENT SYSTEM

Типичные настольные издательские системы (DTP-системы) состоят из сканера (выдающего трихроматические сигналы в ответ на стимулы оригинального изображения), электронно-лучевого или LCD-монитора (обеспечивающих немедленную визуализацию сигналов этого сканера) и принтера (воспроизводящего изображения за счет триадных колорантов, переносимых на ту или иную поверхность).

DTP-системы позволяют воспроизводить цветные изображения очень быстро и с очень низкой себестоимостью процесса, однако стимулы, создаваемые элементами изображений, зависят от специфических характеристик сканера, монитора и принтера. Коль скоро характеристики эти варьируют от аппарата к аппарату (даже в рамках одной марки), результаты репродуцирования одного и того же оригинала разными DTP-комплексами порой отличаются радикально (см. раздел 29.19), поэтому реализация знаменитого принципа WYSIWYG («что видел, то и получил») часто оказывается весьма затруднительной, а во многих случаях просто невозможной (см. раздел 27.11.3). Причин тому как минимум четыре, и речь о них пойдет ниже.

33.13.1 Аппаратная зависимость

Первым и наиболее серьезным препятствием к достижению предсказуемого результата является т.н. *аппаратная зависимость* выходных сигналов устройств, составляющих настольный издательский комплекс: разные сканеры выдают разные RGB-сигналы в ответ на один и тот же стимул оригинала; разные мониторы воспроизводят несколько разные стимулы в ответ на одну и ту же тройку сигналов, посылаемых видеокартой компьютера; разные принтеры при одних и тех же площадях запечатки

ТАБЛИЦА 33.3 Гибридные контонно-полутоновые системы при 300 растровых субэлементах на дюйм

			Пространственное разрешение (ppi)	
Количество контонных градаций	Растровая ячейка	Общее кол-во тоновых градаций	Краев	Градиентов
32	4×4	512	300	75
32	2×2	128	300	150
16	3×3	144	300	100
8	4×4	128	300	75
4	6×6	144	300	50
2	8×8	128	300	37

CMYK-красителями воспроизводят разные спектральные коэффициенты отражения поверхности (и, соответственно, разные стимулы при одном и том же освещении).

33.13.2 Несоответствие условий просмотра

Второе препятствие — различие условий просмотра изображений на экране монитора и условий просмотра принтерных отпечатков. При этом традиционная колориметрия, описывающая меру и характер *воздействия* стимулов на зрительный аппарат человека (но не характер ощущений, возникающих под этим воздействием), к сожалению, неспособна рассчитать параметры двух стимулов, которые будут восприниматься одинаково в разных условиях просмотра (т.н. *согласованные цветовые стимулы* — см. раздел 11.8).

33.13.3 Несоответствие цветовых охватов устройств

Третьим препятствием к достижению предсказуемого результата цветовоспроизведения является несоответствие цветовых охватов стимулов, воспроизводимых устройствами настольного издательского комплекса. К примеру, высоконасыщенный синий может оказаться внутри цветового охвата люминофоров монитора, но вне охвата красителей принтера, в то время как высоконасыщенный голубой может лежать вне охвата кардинальных стимулов монитора, но внутри охвата принтерных отпечатков; или, скажем, высоконасыщенный красный, находящийся внутри охвата красителей фотобумаг, может оказаться вне охвата люминофоров монитора и одновременно вне охвата отпечатков струйного принтера.

Нельзя не сказать о радикальном влиянии характера бумаги на результирующий цветовой охват отражающих отпечатков, к примеру: максимальная просмотровая оптическая плотность[1] изображений, отпечатанных на газетной бумаге, достигает всего

---

1 Под просмотровой оптической плотностью здесь понимается оптическая плотность, измеренная *теле*денситометром, т.е. с учетом паразитной просмотровой подсветки отпечатка. — *Прим. пер.*

лишь 1.25 D, в то время как у отпечатков, выполненных на бумаге высшего качества, данный показатель может выйти на цифры порядка 1.7—1.8 D. Отличия в максимальных просмотровых оптических плотностях влияют не только на результаты тоновоспроизведения, но также и на хроматический охват воспроизводимых стимулов — ни для кого не секрет, что охват насыщенностей газетных отпечатков весьма мал.

Наконец, отметим, что, дабы облегчить перенос изображений с одного носителя на другой, в свое время были позиционированы колориметрические параметры т.н. *эталонного входного носителя* (RIMM — Reference Input Medium Metric) и *эталонного выходного носителя* (ROMM — Reference Output Medium Metric) (Spaulding, Woolfe и Giorgianni, 2000).

33.13.4 Временна́я нестабильность устройств

Четвертой проблемой является то, что характеристики устройств, входящих в состав настольного издательского комплекса, со временем меняются, в частности меняются показатели светоотдачи люминофоров электронно-лучевых трубок, а также характер краскопереноса принтерами.

* * *

Итак, несмотря на то что полностью решить все описанные проблемы невозможно, можно разработать процедуры, минимизирующие перечисленные выше эффекты. Комплект таких процедур получил название «*Системы управления цветовоспроизведением*» — «*Color Management System*».

33.14 АППАРАТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

Итак, как уже было сказано выше, первая и основная проблема, встающая на пути эффективной работы настольных издательских систем, — это т.н. *аппаратная зависимость* сигналов устройств.

Решением является преобразование величин этих сигналов в некое общее математическое пространство, в роли которого, в частности, может выступить пространство трехстимульных значений CIEXYZ, рассчитываемых с использованием трихроматических кривых Стандартного двухградусного наблюдателя (1931 г.) либо же Стандартного десятиградусного наблюдателя (1964 г.). Первый используется чаще, поскольку угловой размер равномерно окрашенных элементов изображений редко превышает 4°.

Однако колориметрическое пространство CIEXYZ представляет позиции стимулов равных перцепционных интервалов весьма неравномерно и поэтому является малоподходящим пространством хранения и передачи визуальной информации.

YCC-пространство, используемое в системе PhotoCD (см. раздел 24.8), гораздо равномернее по перцепционному критерию, но, как показывает практика, оптимальными являются собственно перцепционные пространства CIELAB и CIELUV (MacDonald и Deane, 1993). Кстати говоря, сей факт послужил поводом к тому, что пространство CIELAB используется при факсимильной передаче цветных изображений (Mutz и Lee, 1994) (см. раздел 27.7).

Ликвидировать отличия между аддитивным способом воспроизведения цветовых стимулов самосветящимися дисплеями и субтрактивным способом воспроизведения стимулов отражающими отпечатками можно либо за счет применения особо сложных моделей, описывающих работу всех устройств системы, либо (что является наиболее

распространенной практикой) за счет применения т.н. *таблиц соответствий* (LUT — Look Up Table), позволяющих конвертировать RGB-сигналы монитора в управляющие RGB-сигналы принтера либо в оптические сигналы CMYK (см. также раздел 35.25).

33.15 УЧЕТ УСЛОВИЙ ПРОСМОТРА

Вторая проблема состоит в огромном влиянии условий просмотра на взаимоотношения между колориметрической спецификацией воспроизводимых стимулов (т.е. спецификацией характера их воздействий на зрительный аппарат человека) и результатами их зрительного восприятия. Степень и характер сего влияния можно учесть путем применения т.н. *моделей цветового восприятия* (Katoh, 1994). Примеры таких моделей даны в гл. 35 и Приложении 6.

33.16 ГАМУТ-МЭППИНГ

Третьей проблемой, как мы помним, являются неизбежные отличия в форме и размерах цветовых охватов устройств настольного издательского комплекса. Пожалуй, это самая сложная проблема, решаемая путем т.н. *гамут-мэппинга*.

33.16.1 Первые методы гамут мэппинга

На первых порах были предложены четыре возможных варианта (Murch, 1993):

33.16.1.1 Perceptual (По общему восприятию)

Перцепционные показатели всех элементов оригинала (к примеру, CIELAB-координаты) подвергаются компрессии в направлении белой точки репродукции до такой степени, чтобы не осталось ни одной внеохватной (внегамутной) точки. Компрессия выполняется так, что перцепционные отличия масштабируются пропорционально. Данный способ компрессии более всего подходит воспроизведению фотореалистичных изображений.

33.16.1.2 Colorimetric (Колориметрический)

Колориметрические показатели внутриохватных (внутригамутных) стимулов остаются на своих местах. Показатели внеохватных (внегамутных) переводятся в положение, ближайшее к колориметрическому соответствию. Очевидно, что сие приводит к некоторой дисторсии распределения цветовых ощущений в сравнении с оригиналом. Данный способ компрессии более всего подходит воспроизведению т.н. «спотовых» стимулов (областей равномерной окраски).

33.16.1.3 Tone change (Тоновый сдвиг)

Яркостными соотношениями между элементами оригинала жертвуют во имя удержания требуемых уровней насыщенности (chroma). Данный способ более всего подходит компьютерной графике.

33.16.1.4 Faster matching (Скоростное уравнивание)

Представляет собой некий компромисс между Perceptual- и Tone change-вариантами. Предлагался в свое время в качестве алгоритма, позволявшего сэкономить ресурсы компьютера и сократить время вычислений.

33.16.1.5 Светлотно-пропорциональный

Вариант компрессии насыщенностей элементов оригинального изображения с коэффициентом, лежащим между единицей и величиной компрессии L^*-значений оригинального изображения в тоновый диапазон репродукции (с условием полного фитинга последнего) (Viggiano и Wang, 1992).

33.16.1.6 С финальной гамут-экспансией

Еще один вариант гамут-мэппинга (получивший в свое время широкое распространение в полиграфии) строится на компрессии всех цветов оригинала в целевой охват (гамут-компрессия), с последующим фитингом последнего (гамут-экспансия) (McDonald, 1993). Метод приводил к некоторым искажениям цветового тона и светлоты элементов изображения во имя достижения максимальной насыщенности. Примером может служить воспроизведение на оттисках картины ясного синего неба: cyan-краситель сам по себе имеет некоторый зеленоватый оттенок, однако коррекция цветового тона добавкой magenta несколько снижает насыщенность и светлоту (что крайне нежелательно), поэтому, несмотря на искажения в цветовом тоне, старались использовать чистую cyan-краску.

33.16.2 Современные методы гамут-мэппинга

33.16.2.1 LLIN-метод

Одним из весьма распространенных способов гамут-мэппинга до недавнего времени был т.н. *LLIN-метод* (Morovic, 1998), при котором вначале выполнялась компрессия L^*-значений в целевой тоновый диапазон, а затем производилась редукция насыщенностей (показатели C^*_{ab}), причем в той же пропорции, в которой оказывались сжатыми значения L^* (рис. 33.10).

Справа на рис. 33.10 показано, как точки охвата оригинального изображения масштабируются в целевой охват: мы видим, что насыщенности в светах, к сожалению, подвергаются большей компрессии, чем насыщенности в середине, нижней трети и тенях тонового диапазона изображения.

Здесь следует упомянуть о том, что, коль скоро плоскости постоянного цветового тона в CIELAB-пространстве не являются истинными (т.н. эффект Эбнея), движение точек вдоль этих плоскостей приводит к некоторым искажениям в цветовом тоне элементов репродукции, что порой весьма досадно.

33.16.2.2 GCUSP-метод

Еще одним приемом мэппинга является *метод GCUSP*, позволяющий избежать искажений цветового тона за счет выполнения расчетов не в CIELAB, а в перцепционном пространстве т.н. CIECAM97-модели (см. гл. 35), использующей вместо L^* и C^*_{ab} переменные J и C соответственно.

Так же как и в LLIN-варианте, вначале масштабируются тональные данные (в данном случае это J-данные). При этом значения J есть *нелинейная* функция от C (малый график на рис. 33.11 слева внизу).

На следующем этапе C-значения (представляющие полноту цвета — перцепционный показатель, несколько отличный от насыщенности[1]) уменьшаются по линии, соединяющей точку, J-значение которой подвергнуто компрессии, с фокальной точкой на J-оси, расположенной напротив острого выступа фигуры целевого охвата. Редук-

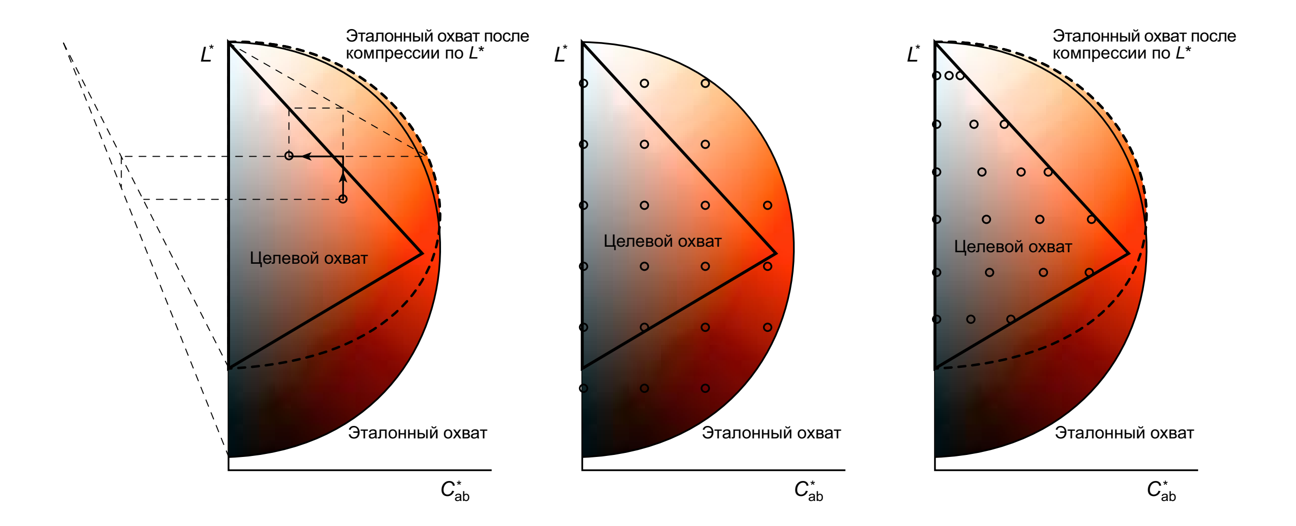


Рис. 33.10 *LLIN*-метод гамут-мэппинга. *Слева*: общая схема геометрического построения векторов компрессии; в центре: облако точек исходного цветового охвата изображения; *справа*: облако точек масштабированного цветового охвата изображения.

ция полноты цвета происходит в той же пропорции, что отношение длины отрезка от границы целевого охвата до фокальной точки к длине отрезка от границы т.н. *эталонного охвата*, но сжатого по J, до этой же точки.

По рис. 33.11 хорошо видно, что точки в целевом охвате по С-направлению распределены равномернее, чем таковые на рис. 33.10.

Описанный механизм можно усовершенствовать, объединив GCUSP-метод с иными алгоритмами мэппинга, использующими т.н. *сигмоидальную компрессию светлоты* и т.н. *коленно-угловое шкалирование* (Braun и Fairchild, 1999a и b).

Наконец, отметим, что лучшие алгоритмы гамут-мэппинга всегда контекстны, т.е. в том числе зависят от цветового охвата исходной сцены или ее оригинального изображения (Morovic и Wang, 2003).

33.16.3 Пути ухода от необходимости гамут-мэппинга

Пожалуй, единственным способом, позволяющим избежать гамут-мэппинга (или по крайней мере существенно понизить его степень) является расширение целевого охвата. К примеру, в полиграфии к стандартному триадному комплекту красок иногда добавляют оранжевую, зеленую и фиолетовую краски, что позволяет увеличить цветовой охват печати и тем самым повысить точность воспроизведения цветовых стимулов в ряде случаев, в частности при репродуцировании произведений живописи (см. раздел 28.16).

Одна из широко известных систем с расширенным охватом — *Hexachrome*, использует дополнительные оранжевую и зеленую краски. Вдобавок к расширению цветового охвата в ней имеет место эффект снижения паразитных хроматических сдвигов, возникающих при смене спектрального состава просмотрового освещения (отметим,

[1] «*C*» означает «colorfulness» — полнота цвета. — *Прим. пер.*

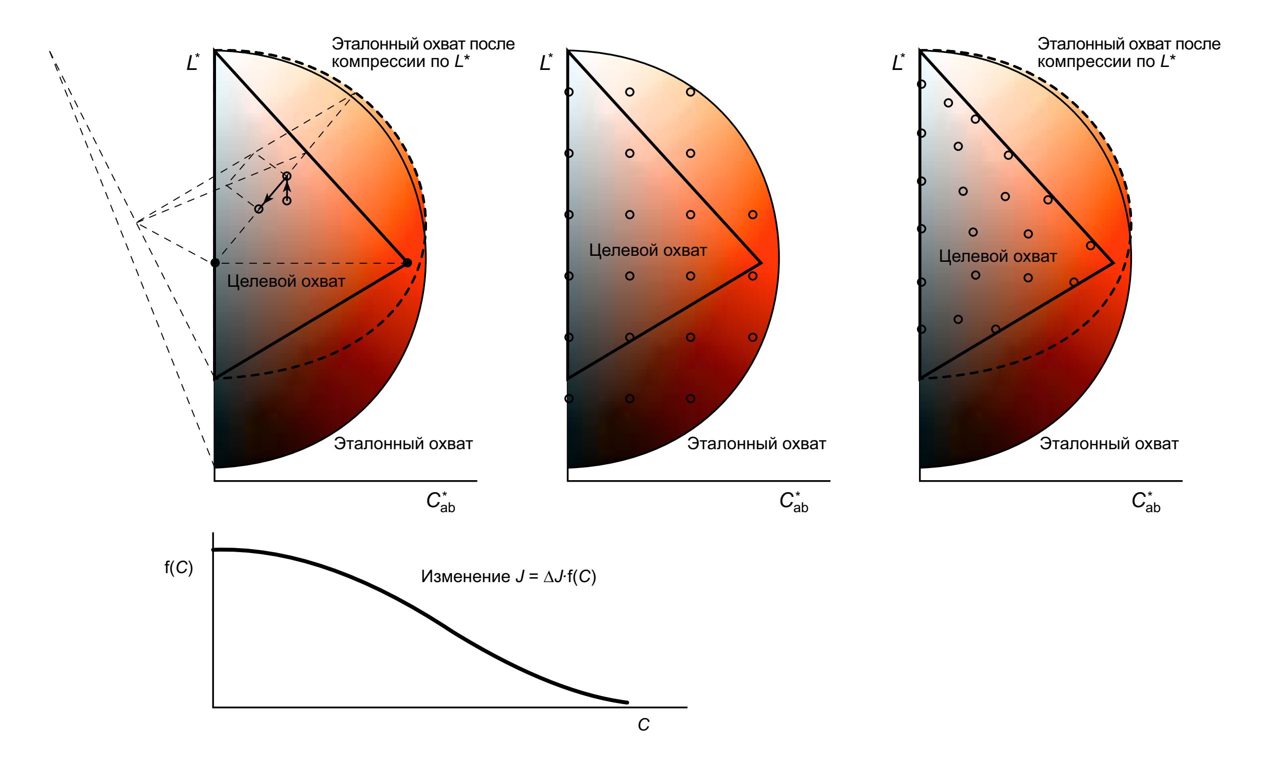


Рис. 33.11 *GCUSP*-метод гамут-мэппинга. *Слева*: общая схема геометрического построения векторов компрессии; в центре: облако точек исходного цветового охвата изображения; *справа*: облако точек масштабированного цветового охвата изображения.

что минимизация сдвигов весьма желательна при издании торговых каталогов — см. раздел 11.4).

33.17 АППАРАТНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

Четвертая проблема, возникающая на пути эффективного цветовоспроизведения настольными издательскими комплексами, — это проблема аппаратной нестабильности устройств, в частности электронно-лучевых трубок и механических узлов принтеров. Решением являются т.н. *аппаратная калибровка* и *ICC-характеризация* этих устройств, проводимые с помощью специального оборудования и программного обеспечения.

Общие принципы и методика калибровки мониторов изложены во многих источниках, в частности в работах Бернса, Мотты и Горзинского (Berns, Motta, Gorzinski, 1993; Berns, Gorzinski, Motta, 1993).

Методика характеризации принтеров, как уже было сказано ранее, строится на применении т.н. *тест-карт характеризации* (см. раздел 29.19.2).

33.18 ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Когда изображение представлено в виде массива цифровых электронных сигналов (цифровое изображение), т.е. получено либо с помощью цифровой фотокамеры, либо с помощью сканера, то в целях повышения качества этого изображения можно манипу-

лировать аппаратными или перцепционными значениями его пикселов (см. раздел 16.15).

Манипуляции могут быть ориентированы на улучшение тонопередачи, имитацию эффектов локальной адаптации зрения (высветление и пропечатка), повышение фотографической широты, повышение или понижение чистоты цвета элементов этого изображения, кадрирование, добавку паспарту и текстов, устранение эффекта красных глаз (Hardeberg, 2002), вызванного светом электронных фотовспышек (см. раздел 10.10) и многое-многое другое.

Инструменты выполнения перечисленных манипуляций (объединенных общим понятием *фото-финишинга*), можно интегрировать в электронные цифровые фотокамеры, принтеры, либо заложить в программное обеспечение отдельного компьютера.

Напомним, что визуализация цифровых изображений на отражающих носителях реализуема с помощью фотографических, электрофотографических, струйных, термовосковых и термосублимационных систем.

33.19 ГЛОССАРИЙ

Стремительное развитие технологий настольных издательских систем привело к появлению в лексике специалистов ряда новых терминов, а также к новому звучанию уже существующих. Некоторые из них приведены ниже:

Adaptive calibration (*адаптивная калибровка*) — аппаратная калибровка с обратной связью.

API (*Application Programming Interface*) — интерфейс прикладного программирования, позволяющий подключить драйвер того или иного устройства к CMS операционной системы.

Cathode Ray Tube (*электронно-лучевая трубка*) — широко распространенное устройство первичной визуализации цифровых изображений (см. раздел 21.4).

Colorimetric rendering (*колориметрическая цветопередача*) — гамут-компрессия, выполняемая путем т.н. *клиппинга* (отсечки) колориметрических значений элементов изображения, лежащих за пределами охвата назначения, на поверхность последнего по критерию максимального колориметрического приближения (см. раздел 33.16).

Color Electronic Prepress System (*CEPS, электронная система допечатной обработки цветных изображений*) — цифровая система, состоящая из сканера, компьютера, монитора и фотонаборного аппарата (имиджсеттера) либо плэйтсеттера (устройства изготовления печатных форм) и позволяющая изготавливать полностью откорректированные полиграфические сепарации.

Color Management System (*CMS, система управления цветовоспроизведением*) — программное обеспечение, осуществляющее управление работой цветовоспроизводящих устройств, входящих в состав настольного издательского комплекса, на основе сопоставления аппаратных сигналов этих устройств с колориметрическими либо перцепционными координатами (т.е. трехстимульными значениями либо цветовыми ощущениями человека, представленными в стандартном CIE-пространстве). Колориметрическое пространство CIEXYZ и пространство перцепционных значений (CIELAB-пространство) выступают в роли пространств связи между устройствами и позволяют выполнять преобразования из пространства аппаратных сигна-

лов одного устройства в пространство аппаратных сигналов другого устройства, обеспечивая тем самым колориметрическое (либо перцепционное) равенство на входе и выходе системы.

Color Management Module либо *Color Manipulation Module* (*CMM, модуль управления цветовоспроизведением*) — программный блок, выполняющий взаимнообратимые математические преобразования между аппаратными сигналами того или иного устройства и эталонным колориметрическим либо цветовым пространством (пространством перцепционных значений). В первом случае выполняется путем матрицирования, во втором — путем табличной интерполяции.

Color space transformation (*преобразование в цветовое пространство*) — процесс преобразования значений аппаратных сигналов устройства в эталонное колориметрическое либо перцепционное (цветовое) пространство и обратно (т.е. в пространство аппаратных значений другого устройства). Может выполняться двухстадийно: первая стадия отвечает за передачу яркостных взаимоотношений стимулов, вторая — за передачу хроматических.

Concatenation (*конкатенация, каскадное преобразование*) — комбинация последовательно выполняемых преобразований в единое преобразование, позволяющее уменьшить ошибки округления.

Contone (*контон*) — непрерывный тон. Антитеза полутону.

Device Color Profile (*профайл устройства*) — файл, содержащий результаты колориметрической характеризации цветовоспроизводящего устройства.

Device calibration (*калибровка устройства*) — процесс измерения выходных характеристик цветовоспроизводящего устройства по его откликам на набор стандартных входных данных и последующее внесение поправок, компенсирующих выявленные отклонения от требуемого соотношения. Может выполняться путем измерения денситометрических или колориметрических показателей серой шкалы и последующей коррекции выходных сигналов. Чаще всего проводится пользователем.

Device characterization (*характеризация устройства*) — процесс диагностики взаимоотношений между аппаратными сигналами устройства и колориметрическими либо перцепционными координатами (трехстимульными значениями либо координатами цветовых ощущений человека, представленными в стандартном CIE-пространстве). Выполняется либо пользователем, либо производителем устройства.

Device dependent color spaces (*аппаратно-зависимые пространства*) — трехмерные математические пространства значений аппаратных сигналов устройств (мощностей электрического сигнала, количеств красителей или диаметров полутоновых точек).

Device independent color spaces (*аппаратно-независимые пространства*) — трехмерные математические пространства колориметрических либо перцепционных значений (трехстимульных значений CIE XYZ либо перцепционных координат CIELAB или CIELUV).

Dynamic range (*динамический диапазон*) — диапазон фотометрических яркостей стимулов, представленных в данной сцене или изображении (см. раздел 13.10).

Gamut compression (*гамут-компрессия*) — процесс сжатия цветового охвата изображения в цветовой охват выводного устройства (в ряде случаев с максимально возможным заполнением последнего — гамут-экспансия) (см. раздел 33.16).

Look Up Table (*LUT, таблица соответствий*) — многомерная таблица соответствий входных значений устройства его выходным значениям. Следует напомнить, что в случае печатающих устройств входными являются значения управляющих сигналов операционной системы, а выходными — колориметрические либо перцепционные показатели стимулов, воспроизводимых (при тех или иных условиях просмотра) изображениями, выполненными этими устройствами.

Matrix transform (*матричное преобразование*) — 3×3-матрица преобразования аппаратных сигналов аддитивного трихроматического устройства (монитора, барабанного сканера) в стандартные колориметрические координаты (трехстимульные значения CIEXYZ) и обратно. Либо матрица преобразования аппаратных сигналов одного аддитивного трихроматического устройства в аппаратные сигналы другого аналогичного устройства.

Perceptual rendering (*perceptual-цветопередача, цветопередача по общему восприятию*) — гамут-компрессия, выполняемая путем пропорционального масштабирования цветового охвата изображения (см. раздел 33.16).

Printer characterization target (*тест-карта характеризации принтера*) — изображение, воспроизведенное системой по некоему стандартному набору аппаратных сигналов. Позволяет диагностировать взаимоотношения между этими сигналами и перцепционными (либо колориметрическими) показателями воспроизводимых стимулов (см. раздел 29.19.2).

Profile Connection Space (*пространство связи профайлов*) — математическое аппаратно-независимое пространство колориметрических либо перцепционных значений, позволяющее выполнять переход от аппаратных сигналов одного устройства к аппаратным сигналам другого на основе принципа колориметрического либо перцепционного равенства между оригиналом и репродукцией.

Raster Image Processor (*RIP, растровый процессор*) — программное обеспечение, позволяющее превратить цифровые данные изображения в полутоновый сигнал.

Render table (*таблица цветопередачи*) — трехмерная таблица соответствий, позволяющая выполнять взаимно-однозначные двунаправленные преобразования между пространствами аппаратных сигналов устройств и аппаратно независимыми колориметрическими либо перцепционными пространствами.

Rendering Intent Module (*RIM, модуль цветопередачи*) — программный блок, выполняющий преобразование между двумя пространствами связи профайлов. Такое преобразование позволяет осуществлять гамут-мэппинг и коррекцию изображения.

Scanner target (*тест-карта характеризации сканера*) — изображение в виде паттерна равномерно окрашенных образцов (патчей), выполненное на отражающем либо на прозрачном носителе, с известными спектральными коэффициентами отражения (пропускания) каждого образца. Позволяет построить диагностическую таблицу соответствий откликов сканера перцепционным (либо колориметрическим) координатам, т.е. выполнить его характеризацию.

Specification for Web-Offset Printing (*SWOP, стандарт печати на мелованной и обычной бумагах*) — система, определяющая взаимоотношения между площадями заполнения поверхности полутоновыми точками стандартной триады и результирующими цветовыми стимулами (см. раздел 29.19.4).

Spot color (*спотовый цвет*) — цветовое ощущение, возникающее под действием стимула, образованного равномерно окрашенной областью поверхности. Существуют т.н. *цветовые именные системы* спотовых цветов, в частности система Pantone.

Standard Color Image Data (*SCID, цифровые тест-изображения*) — набор стандартных цифровых тестовых изображений (см. раздел 29.19.3).

Tone reproduction curve (*TRC, тон-репродукционная кривая, характеристическая кривая*) — кривая, демонстрирующая взаимоотношения между входными и выходными характеристиками цветовоспроизводящего устройства (см. гл. 6).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Berns, R.S., Motta, R.J., and Gorzinski, M.E., Color Res. Appl., 18, 299 (1993).

Berns, R.S., Gorzinski, M.E., and Motta, R.J., Color Res. Appl., 18, 315 (1993).

Braun, G.J., and Fairchild, M.D. Proceedings of SPIE Electronic Imaging Conference, EI'99 (1999a).

Braun, G.J., and Fairchild, M.D. IS & T and SID's 7th Color Imaging Conference, Color Science, Systems, and Applications, pages 167–172, IS & T, Springfield, Va, U.S.A. (1999b)

Floyd, R.W., and Steinberg, L., Proc. Soc. Information Display, 17, 75 (1976).

Hardeberg, J.Y., J. Imaging Science and Technology, 46, 375 (2002).

Katoh, N., SPIE, Vol. 2170, 170 (1994).

Knox, K.T., and Eschbach, R., J. Electronic Imaging, 2, 185 (1993).

MacDonald, L.W., IS & T and SID's Color Imaging Conference: Transforms & Transportability of Color, page 193, IS & T, Springfield, Va, U.S.A. (1993).

MacDonald, L.W., and Deane, J.M., J. Phot. Sci., 41, 106 (1993).

McCann, J., IS & T and SID's Color Imaging Conference: Transforms & Transportability of Color, page 16, IS & T, Springfield, Va, U.S.A. (1993).

Morovic, J., and Wang, Y., IS&T and SID's Eleventh Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies, Applications, pages 143 to 148. IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (2003).

Murch, G., IS & T and SID's Color. Imaging Conference: Transforms & Transportability of Color, page 95, IS & T, Springfield, Va, U.S.A. (1993).

Mutz, A.H., and Lee, D.T., IS & T and SID's 2nd Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, page 52, IS&T, Springfield, Va, U.S.A. (1994).

Spaulding, K.E., Woolfe, G.J., and Giorgianni, E.J., IS&T and SID's Eighth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies, Applications, pages 288 to 294. IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (2000).

Viggiano, J.A.S., and Wang, J., Proceedings 1992, Vol. 2, of the Technical Association of the Graphic Arts; Conference on Comparison of Color Images Presented in Different Media, held at Williamsburg, Va, page 959, TAGA, Rochester, NY (1992).

Yule, J.A.C., Principles of Color Reproduction, Wiley, New York, p. 98 (1967).

Yule, J.A.C., and Nielson, W.J., Tech. Assoc. Graphic Arts, 3, 65 (1951).

ЛИТЕРАТУРА

Burger, R.E., Color Management Systems, The Color Resource, San Francisco (1993).

Giorgianni, E.J., and Madden, T.E., Digital Color Management : Encoding Solutions, Addison-Wesley Longman, Reading, Mass. (1998).

Jackson, R., MacDonald, L.W., and Freeman, K., Computer Generated Color, Wiley, New York (1994).

Morovic, J., IS&T and SID's 6th Color Imaging Congerence : Color Science Systems and Applications, page 53, IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (1998).

Часть шестая

МОДЕЛИ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

34 АЛГОРИТМЫ CAT97 И CON97

34.1 ВВЕДЕНИЕ

Оригинальные сцены и их полноцветные изображения (цветовые репродукции) рассматриваются при самых разнообразных вариантах освещения (см. гл. 5 и 6, разделы 8.8, 8.9 и 8.10). Следовательно, адекватная количественная оценка изображений часто требует применения методов, позволяющих учитывать особенности тех или иных условий просмотра. Лучшим образом выполнить такую оценку можно с помощью т.н. *моделей цветового восприятия* (*моделей результатов цветового восприятия*), которые мы рассмотрим в гл. 35, 36 и Приложении 6. В текущей главе мы обсудим методы, позволяющие учитывать изменения лишь в составе просмотрового освещения.

34.2 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ СДВИГ

Мы помним, что расчет трехстимульных значений предметного стимула выполним на основе данных о спектральном коэффициенте отражения (или пропускания) поверхности и о спектральном распределении энергии падающего на эту поверхность света (см. раздел 8.5). Понятно, что когда спектральный состав падающего света меняется, то при очевидно неизменном спектральном коэффициенте отражения поверхности меняется спектральное распределение энергии образующегося стимула, и, следовательно, меняется характер его воздействия на зрительную систему наблюдателя (о чем свидетельствуют изменения в результирующих трехстимульных значениях). Иными словами:

⇨ *Смена спектрального состава света, падающего на поверхность*, влечет за собой то, что воспроизводимый ею стимул становится *иным* стимулом.

Разница между двумя наборами трехстимульных значений, полученных при разных спектральных составах падающего света, именуется *колориметрическим сдвигом при смене осветителя.* К примеру, если фотография вначале рассматривалась на дневном свету, а затем при свете ламп накаливания, то трехстимульные значения всех ее элементов окажутся сдвинутыми в направлении, указывающем на уменьшение воздействий стимулов, полученных от элементов фотографии при новом освещении, на коротковолновочувствительные колбочки сетчатки (S-колбочки) сообразно ослабевшему коротковолновому компоненту нового освещения.

34.3 АДАПТИВНЫЙ ХРОМАТИЧЕСКИЙ СДВИГ

Колориметрический сдвиг, возникающий при смене осветителя, чаще всего даже приблизительно не согласуется с разницей в цветовых ощущениях, возникающих при смене спектрального состава освещения. Дело в том, что срабатывает механизм *зри-*

тельной адаптации наблюдателя, почти полностью устраняющий отличия в результатах восприятия. Чтобы учитывать сие обстоятельство нужно знать направление и меру т.н. *адаптивного хроматического сдвига*. Данный сдвиг удобнее всего обсуждать в логике т.н. *согласованных стимулов* (см. раздел 11.9).

Напомним, что:

⇨ *Согласованные цветовые стимулы* — это физически разные стимулы, с разными трехстимульными значениями, воспринимаемые одинаково при адаптации зрения по освещениям разной цветности, но равной интенсивности.

Теперь вернемся к нашему примеру, в котором условия просмотра отражающего отпечатка меняются с дневного освещения на свет ламп накаливания. Стимул, образуемый при дневном свете каким-то одним элементом фотографии, будет иметь трехстимульные значения $X_r Y_r Z_r$[1], которые превратятся в другой набор (XYZ) при смене спектрального состава освещения (поскольку этот же элемент изображения будет воспроизводить уже другой стимул). Разница между первой и второй тройкой значений будет представлять собой упомянутый ранее колориметрический сдвиг и укажет на разницу в характерах *воздействия* первого и второго стимулов на зрительную систему наблюдателя.

При этом, если *зрительное ощущение*, вызванное неким прочим стимулом, полученным при дневном свете и имеющем трехстимульные значения $X_c Y_c Z_c$[2], совпадет с ощущением, вызванным стимулом, полученным от элемента отпечатка при свете ламп накаливания и имеющем трехстимульные значения XYZ, то разница между первыми и вторыми трехстимульными значениями (указывающая на разницу *в воздействиях* на зрительную систему наблюдателя) будет именоваться *адаптивным хроматическим сдвигом*.

Величину адаптивного хроматического сдвига удобнее всего вычислять при помощи т.н. *расчета смены хроматической адаптации наблюдателя* (Hunt, 1998), речь о котором ниже.

34.4 РАСЧЕТ СМЕНЫ ХРОМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ

Расчет смены хроматической адаптации наблюдателя оперирует парами согласованных стимулов.

Первый вариант такого расчета был предложен немецким исследователем Иоганнесом фон Кризом (Von Kries, 1911) и получил название *фонкризовского расчета смены хроматической адаптации наблюдателя*. Сей расчет предполагает, что хроматическую адаптацию наблюдателя можно представить колбочковыми откликами сетчатки, умноженными (или разделенными) на некие коэффициенты, в результате чего колбочковые отклики на опорный белый стимул уравниваются между собой при любом статусе адаптации зрительной системы.

Фонкризовский расчет дает весьма добротное представление адаптивных хроматических сдвигов, но сегодня применяются уже более точные схемы. Одной из таких

---

1 Подстрочный индекс «r» означает «reference» — эталонный, поскольку чаще всего колориметрическим эталоном является спектр дневного света. — *Прим. пер.*

2 Подстрочный индекс «c» означает «corresponding» — соответствующий, согласованный. — *Прим. пер.*

схем является т.н. *брэдфордский расчет смены хроматической адаптации* наблюдателя (Lam, 1985, Luo, Lo и Kuo, 1996).

Отметим, что фонкризовский расчет оперирует набором физиологически достоверных колбочковых откликов, тогда как брэдфордский использует набор *условных RGB-откликов* (*RGB-псевдооткликов*), основанный на кривых спектральной чувствительности, совершенно непохожих на физиологические ργβ-кривые и имеющих участки с отрицательными значениями (рис. 34.1).

Второе отличие брэдфордских кривых состоит в том, что *B*-кривая не является строго линейной комбинацией *S*-кривой сетчатки.

В линейных расчетах, в частности фонкризовском, эталонное и тестовое состояния адаптации взаимно обратимы; в расчетах, содержащих нелинейный коэффициент (синий канал в брэдфордском и CAT97-расчетах), эталонное и тестовое состояния взаимно необратимы, и, следовательно, в качестве эталонных приходится использовать два состояния.

Наконец, отметим, что новейший и простейший расчет смены хроматической адаптации, именуемый «CAT02», мы опишем в разделе A6.1 Приложения 6.

34.5 РАСЧЕТ СМЕНЫ ХРОМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ CAT97

Расчет смены хроматической адаптации CAT97 (*Chromatic Adaptation Transform 1997*) — это модифицированный брэдфордский расчет, позволяющий учитывать вариабельность адаптации при разных уровнях фотометрической яркости адаптирую-

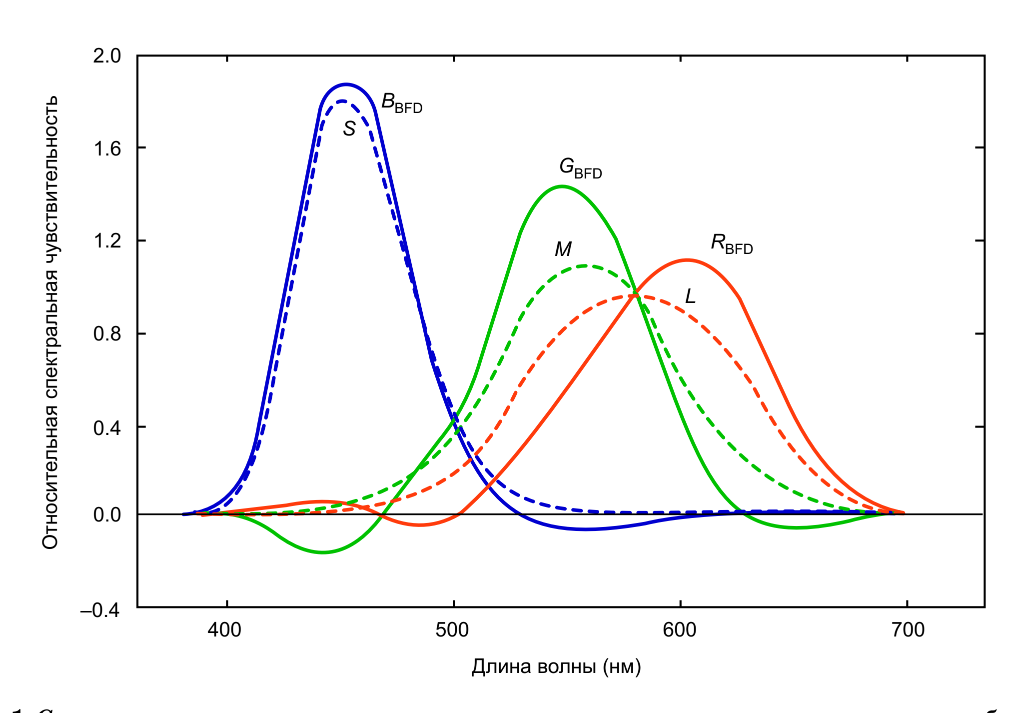


Рис. 34.1 *Сплошные линии*: спектрально-заостренные псевдочувствительности колбочек сетчатки, используемые в брэдфордском расчете смены хроматичсекой дапатации; *пунктирные линии*: подлинные спектральные чувствительности кобочек сетчатки, выведенные Эстевец (Estevez, 1979). Оба набора являются линейной комбинацией трихроматических кривых Стандратного наблюдателя CIE от 1931 г (не считая легкой нелинейности в коротковолновом канале брэдфордских кривых).

щего поля, разных вариантах окружения исследуемого (тестового) стимула, а также при действии т.н. *когнитивных факторов* (Luo и Hunt, 1998).

Расчет состоит из пяти этапов.

Шаг 1

Входные данные:

	Цветность		Фотометрическая яркость
Стимул от образца при тестовом освещении	x	y	Y
Опорный белый стимул при тестовом освещении	x_w	y_w	Y_w
Опорный белый стимул при эталонном освещении	x_{wr}	y_{wr}	Y_{wr}
Фотометрическая яркость адаптирующих полей	L_A		

Величина L_A используется при расчете коэффициента D, позволяющего учитывать уровень (степень) хроматической адаптации. L_A обычно вычисляют по уравнению:

$$L_A = L_W Y_b / 100$$

где Y_b — это Y-значение фона, а L_W — фотометрическая яркость (кд/м^2) идеального отражающего рассеивателя при данном освещении. Сразу отметим, что величина L_A не критична, и если значение L_W неизвестно, то D приравнивается к 0.95 — величине, представляющей типичные условия просмотра отражающих объектов.

Полагают также, что цветность опорных белых стимулов та же, что у соответствующих осветителей (если используются иные белые стимулы, то их параметры следует четко оговорить). Отметим, что величины Y_w и Y_{wr} не оказывают влияния на расчетные характеристики согласованных стимулов.

Целевые данные:

Согласованный стимул при эталонном освещении	X_c	Y_c	Z_c

Шаг 2

Расчет величины z и RGB-псевдооткликов по согласованному стимулу:

$$z = 1 - x - y$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = M_{BFD} \begin{pmatrix} x/y \\ y/y \\ z/y \end{pmatrix}, \text{ где } M_{BFD} = \begin{pmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{pmatrix}$$

Аналогичным образом из x_w, y_w и z_w высчитываются псевдоотклики R_w, G_w и B_w, а из x_{wr}, y_{wr} и z_{wr} — R_{wr}, G_{wr} и B_{wr}.

Шаг 3

Определение уровня адаптации (величины D-коэффициента)

$$D = F - F\Big/\left[1 + 2(L_A^{1/4}) + (L_A^2/300)\right]$$

где $F = 1$ по стимулам, предъявленным в окружении, фотометрическая яркость которого равна средней фотометрической яркости образцов в комплекте, и $F = 0.9$ по стимулам, предъявленным в тусклом или темном окружениях.

Однако ежели когнитивный компонент восприятия таков, что хроматическая адаптация является полной (т.е. осветитель в сознании наблюдателя полностью обесцвечен), коэффициент D приравнивается к единице.

Когда адаптация полностью отсутствует (например, в первый момент после смены условий просмотра), то $D = 0$.

Когда когнитивное обесцвечивание осветителя частично, например при проекционном просмотре слайдов в темном окружении, D вычисляется по формуле:

$$D = \frac{1 + F - F\Big/\left[1 + 2(L_A^{1/4}) + (L_A^2/300)\right]}{2}$$

Шаг 4

Вычисление согласованных $R_cG_cB_c$-псевдооткликов на стимул при эталонном осветителе:

$$R_c = \left[D(R_{wr}/R_w) + 1 - D\right]R$$

$$G_c = \left[D(G_{wr}/G_w) + 1 - D\right]G$$

$$B_c = \left[D(B_{wr}/B_w^p) + 1 - D\right]\left|B\right|^p \text{ при } B \geq 0$$

$$B_c = -\left[D(B_{wr}/B_w^p) + 1 - D\right]\left|B\right|^p \text{ при } B < 0, \text{ где } p = (B_w/B_{wr})^{0.0834}$$

Шаг 5

Вычисление согласованных $X_cY_cZ_c$-значений стимула при эталонном осветителе:

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = M_{BFD}^{-1}\begin{pmatrix} R_cY \\ G_cY \\ B_cY \end{pmatrix}, \text{ где } M_{BFD}^{-1} = \begin{pmatrix} 0.98699 & -0.14705 & 0.15996 \\ 0.43231 & 0.51836 & 0.04926 \\ -0.00853 & 0.04004 & 0.96849 \end{pmatrix}$$

* * *

Методика инверсии CAT97 дана в разделе 34.7.

34.6 ИНДЕКС ЦВЕТОВОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ (CON97)

Воспроизведению самосветящихся изображений (как, скажем, при телевизионном показе или визуализации цифрового файла экраном монитора) специального источника освещения не требуется. Но показу слайдов или отпечатков всегда необходим осве-

титель, и в этих случаях крайне важным является учет изменений в восприятии, возникающих в результате изменений в характере освещения.

Отследить изменения можно визуально, рассматривая один и тот же образец в свете разных источников. Однако сие далеко не так просто, как может показаться на первый взгляд: когда спектральный состав освещения меняется быстро, зрение не успевает адаптироваться, но когда времени достаточно и наступает полная адаптация, то очень трудно запомнить характер цветового ощущения, возникавшего при предыдущем источнике. Следовательно, необходимы инструментальные методы оценки, и, в частности, потому, что очень часто имеют место обстоятельства, когда цветорепродукционная система задействует комбинации множества красок самого разного происхождения, но при этом нет образцов, пригодных к визуальной инспекции.

Итак, нетрудно догадаться, что методика инструментальной оценки изменений, возникающих при смене характера освещения, зиждется на описанном в предыдущем разделе расчете смены хроматической адаптации наблюдателя.

Инструментальный метод требует измерения трехстимульных значений (XYZ) стимула, создаваемого образцом при тестовом освещении, к примеру при Стандартном А-осветителе, и трехстимульных значений второго стимула, создаваемого тем же образцом ($X_rY_rZ_r$) при эталонном освещении, скажем D_{65}. После этого выполняется расчет смены хроматической адаптации, прогнозирующий $X_cY_cZ_c$-значения согласованного стимула, т.е. стимула, который при эталонном освещении вызовет точно такое же цветовое ощущение, что исходный (тестовый) стимул при освещении тестовом.

Если $X_cY_cZ_c$-значения окажутся отличными от значений $X_rY_rZ_r$, то величина этого отличия явится мерой *цветовой нестабильности* образца при смене тестового освещения на эталонное (см. рис. 34.2). При вычислении трехстимульных значений согласованного стимула коэффициент D приравнивается к единице, дабы по опорному белому отличие оказалось равным нулю, поскольку считается, что идеальный отражающий рассеиватель обладает нулевой цветовой нестабильностью.

Итак, степень цветовой нестабильности образца можно рассчитать в показателях т.н. *индекса цветовой нестабильности* от 1997 г. (*Color Inconstancy Index 1997 — CON97*):

Шаг 1

Измеряются колориметром или вычисляются из спектральных данных XYZ-значения стимула, созданного образцом при тестовом освещении. Аналогично измеряются (или вычисляются из спектральных данных) $X_rY_rZ_r$-значения стимула, созданного этим же образцом при освещении эталонном. Разница между $X_rY_rZ_r$- и XYZ-значениями, напомним, будет представлять собой *колориметрический сдвиг,* возникающий при смене осветителя.

Шаг 2

Используя CAT97 при $D = 1$, из XYZ-значений стимула, инициированного образцом при тестовом освещении, вычисляются $X_cY_cZ_c$-значения согласованного стимула при освещении эталонном. Разница между $X_cY_cZ_c$- и XYZ-значениями, напомним, будет представлять собой *адаптивный хроматический сдвиг.*

Шаг 3

С помощью той или иной формулы цветовых отличий (коих несколько, в частности — CIEΔE^*_{ab}, CMC, CIE94, CIE DE2000) вычисляется разница между значениями $X_rY_rZ_r$ и $X_cY_cZ_c$, которая и являет собой *индекс цветовой нестабильности* (CON97).

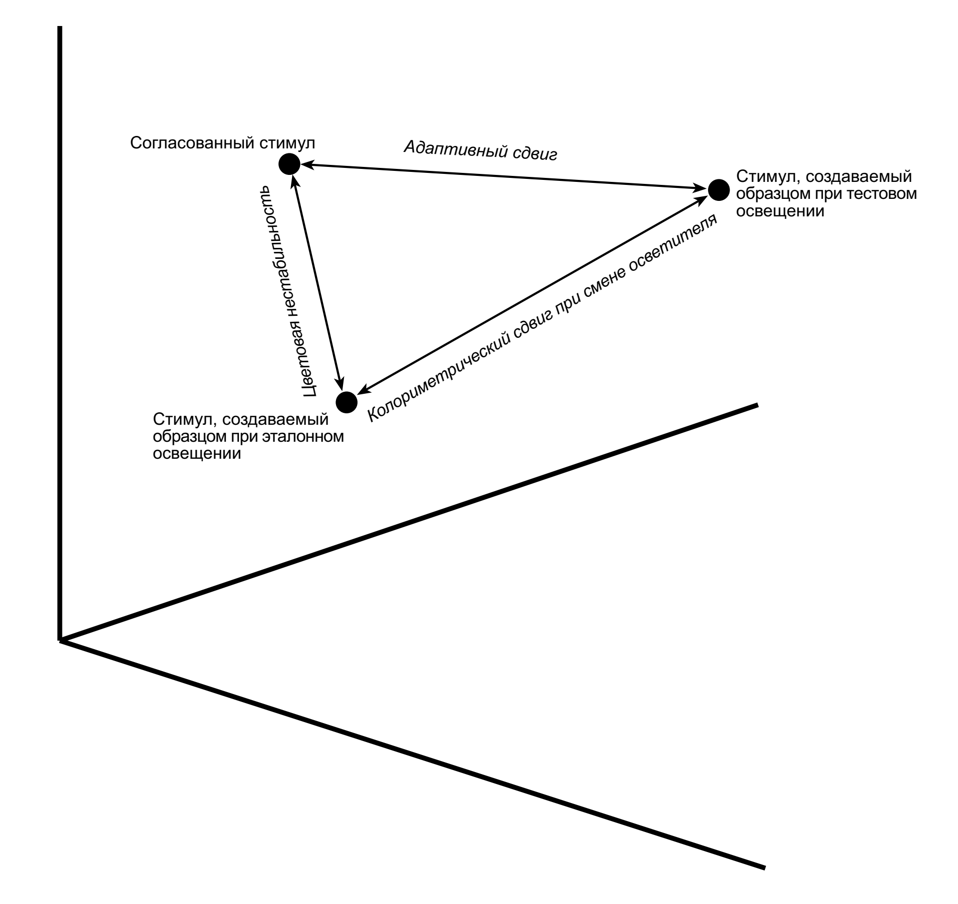


Рис. 34.2 Взаимоотношения между колориметрическим сдвигом, возникающим при смене осветителя, адаптивным сдвигом и цветовой нестабильностью.

Примечание 1

Коль скоро *XYZ*-значения можно рассчитать либо на основе трихроматических кривых Стандартного колориметрического наблюдателя CIE от 1931 г., либо на основе трихроматических кривых Дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя CIE от 1964 г., вариант использованных кривых должен четко оговариваться. Поэтому во втором случае принято все колориметрические данные снабжать подстрочным индексом 10.

Примечание 2

Оба осветителя должны быть специфицированы, и всегда, когда только возможно, в качестве эталонного должен выступать Стандартный D-осветитель.

Примечание 3

Использованная формула цветовых отличий должна быть четко оговорена.

34.7 ИНВЕРСИЯ CAT97

В некоторых ситуациях (например, при подготовке изображений к печати в нестандартных просмотровых условиях. — *Прим. пер.*) требуется выполнение обратного расчета смены хроматической адаптации. Алгоритм, применимый к CAT97, дан ниже (Hunt, 1997).

Понятно, что исходными данными в этом случае явятся величины $X_cY_cZ_c$.

Обратный шаг 1

$$\begin{pmatrix} R_c Y \\ G_c Y \\ B_c Y \end{pmatrix} = M_{BFD} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix}$$

Обратный шаг 2

$$(Y/Y_c)R_c,\ (Y/Y_c)G_c,\ (Y/Y_c)B_c$$

Обратный шаг 3

$$(Y/Y_c)R = (Y/Y_c)R_c \big/ \left[D(R_{wr}/R_w) + 1 - D\right]$$
$$(Y/Y_c)R = (Y/Y_c)G_c \big/ \left[D(G_{wr}/G_w) + 1 - D\right]$$
$$(Y/Y_c)^{1/p} B = \left[\left|(Y/Y_c)B_c\right|\right]^{1/p} \Big/ \left[D(B_{wr}/B_w^p) + 1 - D\right]^{1/p}$$

Если $(Y/Y_c)B_c < 0$, то $(Y/Y_c)^{1/p} B$ должно быть меньше 0.

Обратный шаг 4

$$Y' = 0.43231YR + 0.51836YG + 0.04929(Y/Y_c)^{1/p} BY_c$$

$$(Y/Y_c)^{(1/p-1)}$$

Обратный шаг 5

$$\begin{pmatrix} X''/Y_c \\ Y''/Y_c \\ Z''/Y_c \end{pmatrix} = M_{BFD}^{-1} \begin{pmatrix} (Y/Y_c)R \\ (Y/Y_c)G \\ (Y/Y_c)^{1/p} B \big/ (Y/Y_c)^{(1/p-1)} \end{pmatrix}$$

Обратный шаг 6

Умножение X''/Y_c, Y''/Y_c и Z''/Y_c на Y_c и получение $X''Y''Z''$, плотно аппроксимирующих XYZ.

Примечание:

Величина Y' несколько отлична от Y, поскольку вместо YB используется $(Y/Y_c)^{1/p} BY_c$. Однако умножение на 0.04929 позволяет свести отличия к минимуму. Показатель $(Y/Y_c)^{1/p} B/(Y'/Y_c)^{(1/p-1)} = (Y/Y_c)B(Y/Y')^{(1/p-1)}$, однако поскольку Y и Y' очень близки друг к другу, а p редко когда отличен от 1.0 (по А-осветителю он равен 0.914), то $(Y/Y_c)^{1/p} B/(Y'/Y_c)^{(1/p-1)} \approx (Y/Y_c)B$, что необходимо для получения корректных величин X/Y_c, Y/Y_c и Z/Y_c.

* * *

Напомним, что в Приложении 6 мы рассмотрим модель смены хроматической адаптации CAT02, положенную в основу модели CIECAM02.

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Estevez, O. On the fundamental data base of normal и dichromatic vision. Ph.D. Thesis. University of Amsterdam (1979).

Hunt, R.W.G. Measuring Colour, 3rd Edn., p. 124, Fountain Press, Kingston-upon-Thames (1998).

Hunt, R.W.G. Color Res. Appl., 22, 355 (1997).
Lam, K.M. Metamerism и colour constancy. Ph.D. Thesis. University of Bradford (1985).
Luo, M.R., и Hunt, R.W.G. Color Res. Appl., 23, 154 (1998).
Luo, M.R., Lo, M.-C. & Kuo, W.-G. Color Res. Appl., 21, 412 (1996).
Von Kries, J.A. In Hиbuch der Physiologisches Optik, Vol. II (W. Nagel, ed), pp. 366–369, Leopold Voss, Hamburg (1911).

35 МОДЕЛЬ CIECAM97S

35.1 ВВЕДЕНИЕ

Учет визуальных эффектов, возникающих при смене условий просмотра сцен и изображений сцен, в частности характера освещения, удобнее всего выполнять с помощью т.н. *моделей цветового восприятия* (*моделей результатов цветового восприятия*). Такие модели на протяжении нескольких десятков лет разрабатывались множеством исследователей: Сэймом и Вальбергом (Seim и Valberg, 1986), Наятани, Токахамой, Собагаки, Хашимото и Яно (Nayatani, Takahama и Sobagaki, 1986; Nayatani, Hashimoto, Takahama и Sobagaki, 1987; Nayatani, Takahama, Sobagaki и Hashimoto, 1990; Nayatani, Sobagaki, Hashimoto и Yano, 1997), Фершильдом и Бернсом (Fairchild и Berns, 1993; Fairchild, 1996), Хантом, Поинтером, Луо, Ло и Куо (Hunt и Pointer, 1985; Hunt, 1982, 1985, 1987, 1989, 1991 и 1994; Hunt и Luo, 1994; Luo, Lo и Kuo, 1996; Fairchild, 1997).

Любопытно, что модели цветового восприятия позволяют прогнозировать не только *величины — корреляты* цветового тона (hue), чистоты цвета (saturation), насыщенности (chroma) и светлоты (lightness), используемые в системах CIELAB и CIELUV, но также показатели субъективной яркости (brightness) и полноты цвета (colorfulness). Последние все чаще находят практическое применение (Pointer, 1986; MacDonald, Luo и Scrivener, 1990; Luo, Clarke, Rhodes, Schappo, Scrivener и Tait, 1991; Attridge, Pointer и Jacobson, 1997).

В 1997 г. Международная светотехническая комиссия (CIE) утвердила модель, основанную на лучших компонентах всех ранее существовавших моделей и получившую название CIECAM97s (Luo и Hunt, 1998), которая будет рассмотрена в текущей главе, а ее последнее обновление — модель CIECAM02 — в Приложении 6.

Отметим, что CIECAM97s отличается от модели Hunt 94, представленной в пятой редакции данной книги, по следующим параметрам:

— смена хроматической адаптации наблюдателя моделируется CAT97-преобразованием, описанным в 34 главе;

— в уравнениях расчета показателя насыщенности изменены некоторые константы;

— изменены способы расчета т.н. *предикторов* (прогностических показателей) светлоты, чистоты цвета, субъективной яркости и полноты цвета.

Входные данные CIECAM97s даны в разделах 35.22 и 35.24.

35.2 ПОЛЕ ЗРЕНИЯ

В отношении т.н. *неизолированных цветовых стимулов*, т.е. стимулов, соседствующих с другими стимулами (что свойственно изображениям реальных сцен), позиционировано пять компонент поля зрения:

⇨ *Цветовой элемент* — равномерно окрашенный образец с угловым размером 2°, создающий собственно исследуемый стимул.

- ⇨ *Проксимальное поле* — непосредственное окружение цветового элемента, распространяемое по всем направлениям на 2° от края последнего.
- ⇨ *Фон* — окружение цветового элемента, распространяемое по всем направлениям на 10° от края проксимального поля. Когда проксимальное поле создает тот же стимул, что и фон, последний рассматривается как расширение первого.
- ⇨ *Окружение* — пространство за границами фона.
- ⇨ *Адаптирующее поле* — все объекты, сопутствующие цветовому элементу, включая проксимальное поле, фон, окружение, а также все прочие предметы в поле зрения.

Объекты реальных сцен бесконечно разнообразны по спектральному составу образуемых ими стимулов. Однако феномен т.н. *цветовой константности* (см. гл. 34) радикально снижает это разнообразие в восприятии. Условное деление поля зрения на компоненты позволило облегчить ситуацию, дав тем самым возможность эффективного прогнозирования результатов цветового восприятия стимулов при разных условиях просмотра и с учетом важнейших факторов, влияющих на эти результаты.

Когда угловой размер исследуемого стимула превышает 4°, его трехстимульные значения должны рассчитываться по трихроматическим кривым Дополнительного стандартного колориметрического наблюдателя CIE и снабжаться подстрочным индексом «10».

Наконец, отметим, что проксимальное поле как таковое сегодня пока не используется, но оно включено в спецификацию поля зрения с целью упрощения моделирования эффектов *симультанного контраста* и *смазывания* будущими моделями.

35.3 ХРОМАТИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ

В 1997 г. CIE утвердила схему расчета смены хроматической адаптации наблюдателя (см. раздел 34.5) — *CAT97* (*Chromatic Adaptation Transform*). Сей расчет используется в качестве инструмента конверсии трехстимульных значений (XYZ) исследуемого (тестового) стимула в трехстимульные значения ($X_cY_cZ_c$) стимула, предъявленного в эталонных условиях просмотра и согласованного с исследуемым по зрительному ощущению.

35.3.1 Неполная хроматическая адаптация и эталонная цветность

Поскольку достаточно часто возникает практическая необходимость в прогнозировании результатов восприятия при неполной хроматической адаптации (Nayatani, 1997), в спецификацию эталонных условий просмотра должна входить эталонная цветность, относительно которой тестовые условия можно рассматривать как более или менее хроматичные. В качестве эталонной цветности выбрали цветность равноэнергетического стимула (S_E), поскольку, как в свое время было показано Джеймсоном и Гурвичем (Hurvich и Jameson, 1951), такой стимул при темновой адаптации воспринимается ахроматичным.

35.3.2 Полная хроматическая адаптация и когнитивное обесцвечивание осветителя

Когда наблюдатель пытается идентифицировать объект по цветовому ощущению, его зрительная система очень часто выполняет т.н. *перцепционный учет* цветности превалирующего освещения (McCann и Houston, 1983; Arend и Reeves, 1986). К примеру, когда наблюдатель с листом бумаги в руках входит с улицы в помещение, освещенное светом ламп накаливания, то, несмотря на то, что при этих лампах бумага воспринимается желтоватой, она все равно идентифицируется наблюдателем как белая. Сей эффект иногда называют *эффектом когнитивного обесцвечивания осветителя*.

Данный режим восприятия (режим полной хроматической адаптации) можно смоделировать, установив D-параметр CAT97 на единицу. Когда адаптации нет, то D устанавливается на ноль. В отношении же большинства просмотровых ситуаций принята следующая схема: D стремится к единице по мере роста фотометрической яркости адаптирующего стимула. В ситуациях, когда превалирующее освещение *частично* обесцвечено зрительной системой наблюдателя, например при проекционном показе слайдов в темном окружении, D можно установить на некое промежуточное значение.

Напомним, что RGB-переменные CAT97 не являются подлинными величинами колбочковых откликов, но лишь их линейной комбинацией, имеющей в своем составе участки отрицательных значений (см. рис. 34.1). Поэтому полученные трехстимульные значения ($X_c Y_c Z_c$) согласованного стимула затем необходимо преобразовать в набор колбочковых откликов.

35.4 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОЛБОЧЕК

Набор подлинных спектральных чувствительностей колбочек человеческой сетчатки показан на рис. 35.1. Приведенные кривые являются линейной комбинацией трихроматических кривых $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ Стандартного колориметрического наблюдателя CIE от 1931 г. По обоим Стандартным наблюдателям (основному от 1931 г. и дополнительному от 1964 г.) спектральные чувствительности колбочек получены из соответствующих трихроматических кривых путем матричного расчета по следующим уравнениям:

$$\rho = 0.38971X + 0.68898Y - 0.07868Z$$
$$\gamma = -0.22981X + 1.18340Y + 0.04641Z$$
$$\beta = 1.00000Z$$

Соответствующий набор уравнений обратного преобразования выглядит следующим образом:

$$X = 1.91019\rho - 1.11214\gamma + 0.20195\beta$$
$$Y = 0.37095\rho + 0.62905\gamma$$
$$Z = 1.00000\beta$$

Коэффициенты в обоих наборах уравнений подобраны так, что величины колбочковых откликов ($\rho\gamma\beta$) на равноэнергетический стимул (S_E) оказываются равными друг другу.

Величины ρ, γ и β можно рассматривать как количества излучения, эффективно по-

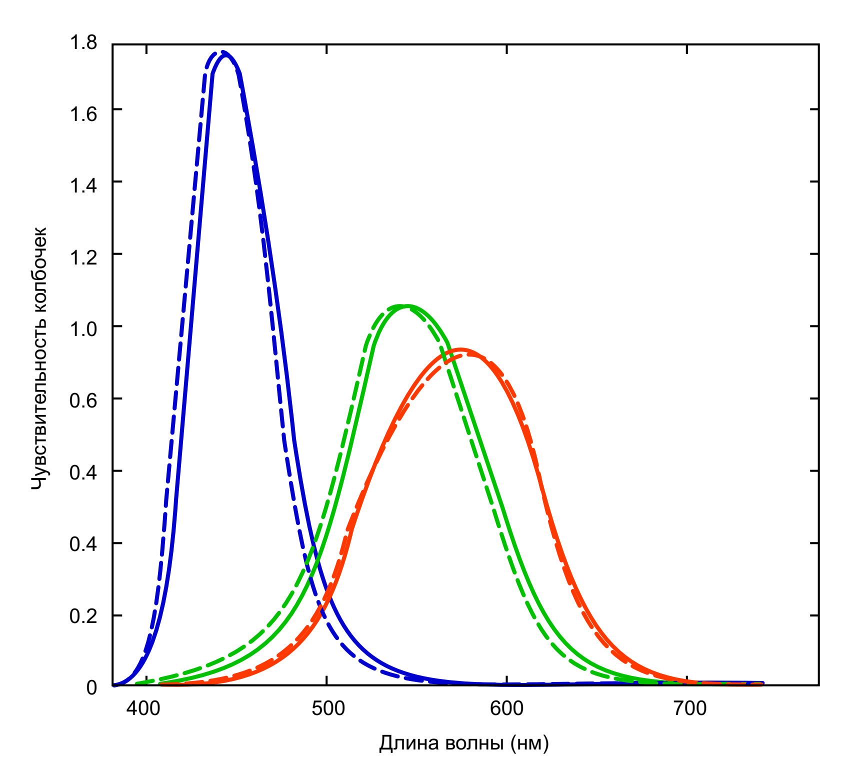


Рис. 35.1 Функции спектральных чувствительностей колбочек, используемые в моделях колбочкового зрения (сплошные линии), в сравнении с кривыми Эстевец (пунктирные линии). По оси абсцисс отложены длины волн света, падающего на роговицу глаза (не на сетчатку).

глощенные колбочками трех разных типов (на единицу площади сетчатки) при эталонном статусе адаптации по свету, падающему на роговицу глаза.

Пунктирные линии на рис. 35.1 демонстрируют спектральные чувствительности колбочек, полученные в исследованиях Эстевец по двухградусному наблюдателю (Estevez, 1979). Кривые Эстевец не являются точной линейной комбинацией трихроматических кривых двухградусного Стандартного наблюдателя CIE (что на практике создает большие неудобства), поэтому используются кривые, данные сплошными линиями.

В приведенных выше уравнениях коэффициенты подобраны так, что пик правой кривой приходится на 565 нм (вместо 585 нм), что подтверждается рядом исследований (Smith и Pokorny, 1972). Стоит сказать, что сдвиг пиков примерно на 20 нм почти не оказывает влияния на прогностическую точность моделей восприятия, но несколько усложняет критерии выбора т.н. *однозначных цветовых тонов* (см. раздел 35.9).

Отметим также, что приведенный выше набор уравнений расчета колбочковых откликов ($\rho\gamma\beta$) используется в том числе при вычислении трехстимульных значений согласованных стимулов ($X_c Y_c Z_c$).

35.5 ФУНКЦИИ КОЛБОЧКОВЫХ ОТКЛИКОВ

Очевидно, что мы должны уметь прогнозировать зависимость колбочковых откликов от интенсивности стимула, предъявленного в данных условиях просмотра (под интенсивностью стимула мы понимаем только колориметрическое количество стимула,

но не световой поток на единицу телесного угла). Существует множество доказательств тому, что взаимоотношения эти нелинейны.

35.5.1 Корнеквадратная функция

Если колбочковый отклик принять как пропорциональный корню квадратному от интенсивности стимула, то кривизну линий постоянного цветового тона на диаграмме цветностей можно предсказать довольно легко (Hunt, 1982). Правда, применение корнеквадратной зависимости влечет за собой редукцию динамического диапазона сигналов, передаваемых из сетчатки в мозг, к примеру: падение интенсивности стимула в 1000 раз ведет к падению величины колбочкового отклика всего в 32 раза.

Однако простые корнеквадратные взаимоотношения касаются далеко не всех возможных интенсивностей стимула: когда интенсивность очень мала, т.н. *физиологический шум* зрительной системы препятствует извлечению полезной информации из сверхмалого колбочкового отклика; когда интенсивность стимула очень высока, то отклик доходит до максимального уровня (насыщение колбочек), за которым уже не в состоянии меняться (Baylor, 1987). Данные ограничения иллюстрируют неспособность нашей зрительной системы распознавать хроматические модуляции в очень темных объектах, а также тенденцию к обесцвечиванию особо ярких стимулов (к примеру, когда раскаленная спираль лампы накаливания рассматривается через окрашенный фильтр, она все равно выглядит белой либо почти белой).

35.5.2 Гиперболическая функция

Несмотря на сказанное в предыдущем подразделе, командой разработчиков CIECAM97s вместо корнеквадратной была выбрана гиперболическая функция колбочкового отклика (верность такого выбора доказывают физиологические исследования Boynton и Whitten, 1970, а также Valeton и Van Norren, 1983). Отклики колбочек трех разных типов при данном статусе адаптации зрения сформулированы как:

$$f_n(\rho)+1=40\left[\rho^{0.73}/(\rho^{0.73}+2)\right]+1$$
$$f_n(\gamma)+1=40\left[\gamma^{0.73}/(\gamma^{0.73}+2)\right]+1,$$
$$f_n(\rho)+1=40\left[\beta^{0.73}/(\beta^{0.73}+2)\right]+1$$

где «+1» представляет физиологический шум.

Диапазон откликов в этом случае простирается от 1 (минимальное значение) до 41 (максимальное).

На рис. 35.2 десятичный логарифм $[f_n(\rho)+1]$ дан как функция от $\lg\rho$. Мы видим, что в районе центральной части графика отклик длинноволновочувствительных колбочек устойчиво аппроксимирует корнеквадратную зависимость (пунктирная линия), но на периферии функция сильно отклоняется от корнеквадратной. Отклики $f_n(\gamma)+1$ и $f_n(\beta)+1$ представлены аналогичными кривыми.

35.6 ЯРКОСТНАЯ АДАПТАЦИЯ

Фактический колбочковый отклик зависит не только от интенсивности стимула, но также от статуса адаптации зрительной системы наблюдателя. Адаптация дает частичную (а иногда и полную) компенсацию визуальных эффектов, возникающих в пер-

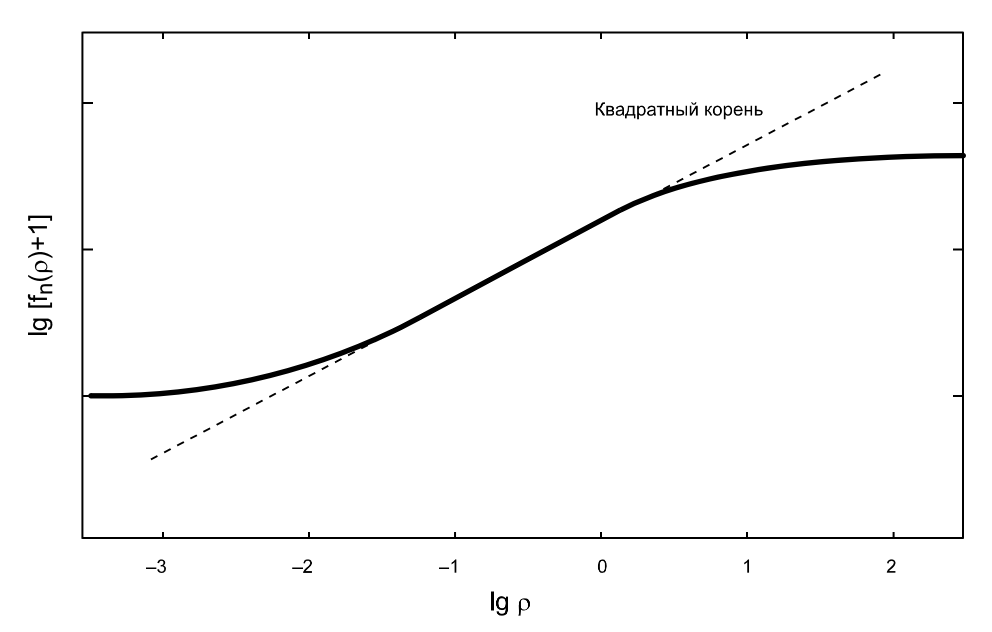


Рис. 35.2 Логарифмированный колбочковый отклик ($\lg[f_n(\rho)+1]$, где $f_n(\rho)=40\left[\rho^{0.73}/(\rho^{0.73}+2)\right]$) как функция от логарифма эффективно поглощенного излучения ($\lg\rho$).

вый момент после смены интенсивности и цветности освещения, являясь физиологическим субстратом такого феномена, как *цветовая константность* (см. гл. 34).

Мы помним, что учет факта компенсации зрением изменения в цветности (но не интенсивности) освещения выполняется с помощью CAT97 (расчет смены хроматической адаптации — см. раздел 34.5). Для учета же компенсации смены интенсивности освещения в CIECAM97s введен специальный коэффициент — *коэффициент степени яркостной адаптации* — F_L. Таким образом, т.н. *постадаптационные колбочковые отклики* формулируются так:

$$\rho_a = f_n(F_L\,\rho/\rho_{wr})+1$$
$$\gamma_a = f_n(F_L\,\gamma/\gamma_{wr})+1\,,$$
$$\beta_a = f_n(F_L\,\beta/\beta_{wr})+1$$

где $f_n(I)+1=40\left[I^{0.73}/(I^{0.73}+2)\right]$, а коэффициенты ρ_{wr}, γ_{wr} и β_{wr} — это ρ-, γ- и β- значения колбочковых откликов на согласованный стимул в эталонных условиях просмотра и при эталонном равноэнергетическом белом (S_E). Эталонному белому стимулу, который создает идеальный отражающий рассеиватель, присвоена эталонная цветность, равная цветности равноэнергетического S_E-осветителя (эталонная цветность). Однако заметим, что Y-значение (100), присвоенное эталонному белому стимулу (Y_{wr}), не оказывает влияния на XYZ-значения стимула согласованного. Так происходит потому, что параметры эталонного белого стимула (R_{wr}, G_{wr} и B_{wr}), участвующие в расчете, получены из *отношений* между его трехстимульными значениями, что равно отношениям между координатами его цветности.

Однако когда прогнозируется числовой коррелят светлоты (L) исследуемого стимула, Y-значение эталонного белого влияет на результат (см. определение светлоты в разделе 7.2), и белый, принятый в эталонных условиях, подбирают как согласованный тестовому белому. Идеальный отражающий рассеиватель не очень подходит для реше-

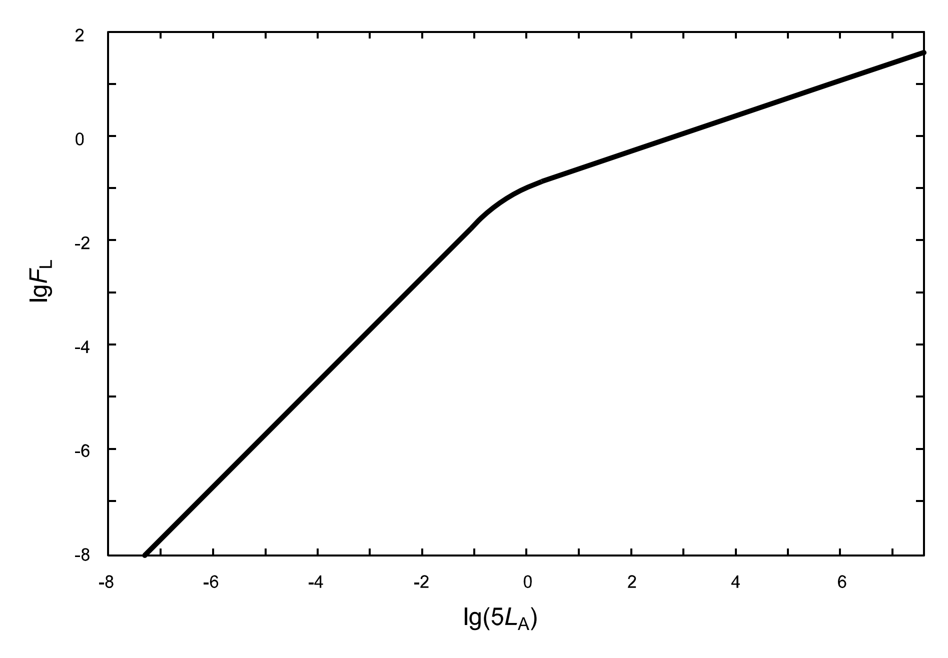


Рис. 35.3 Десятичный логарифм коэффициента степени яркостной адаптации как функция от десятичного логарифма пятикратной фотометричиеской яркости адаптирующего поля (т.е. фотометрической яркости типичного белого стимула).

ния такой задачи, поскольку если с его помощью оценивать ощущение светлоты от тестового белого стимула, то светлота последнего окажется ощутимо меньшей — то есть ощущение окажется сероватым, но не подлинно белым. Отметим также, что выбор Y-значений эталонного и тестового белых влияет на показатели их субъективной яркости (Q-величины) при эталонном статусе адаптации.

Когда коэффициенты ρ_{wr}, γ_{wr} и β_{wr} используются без применения F_L, это значит, что компенсация зрением изменений в уровне освещенности объявляется полной. Однако на практике компенсация эта, как правило, неполна: вспомним, что при слабом освещении объекты воспринимаются менее яркими (с меньшей субъективной яркостью), чем при освещении сильном, даже если сетчатка при этом полностью адаптирована.[1]

Итак, коэффициент F_L моделирует неполноту яркостной адаптации и определен уравнением:

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1-k^4)^2\sqrt[3]{(5L_A)},$$

где L_A — фотометрическая яркость адаптирующего поля, а $k = 1/(5L_A + 1)$.

На рис. 35.3 десятичный логарифм F_L дан как функция от $\lg(5L_A)$: четко видно, что при фотопических уровнях освещенности сцены ($5L_A > 1$; $\lg(5L_A) > 0$) F_L примерно пропорционален корню кубическому из $5L_A$ (тангенс угла наклона кривой равен 1/3), что имитирует неполноту яркостной адаптации при изменении фотометрической яркости адаптирующего поля. Полную компенсацию можно имитировать, если $F_L = \text{const}$.

На скотопических уровнях освещенности ($5L_A < 0.1$; $\lg(5L_A) < -1$) F_L примерно про-

---

[1] Но при этом могут оставаться равновелико светлыми по отношению к какому-либо стимулу, субъективная яркость которого принята за эталонную. — *Прим. пер.*

порционален $5L_A$ (тангенс наклона кривой 1), что имитирует полное отсутствие яркостной адаптации.

Наконец, отметим, что фотометрическая яркость белого стимула при данном статусе адаптации равна пятикратной фотометрической яркости адаптирующего поля.

35.7 КРИТЕРИИ АХРОМАТИЧНОСТИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ЦВЕТОВОМ ТОНЕ

Как было показано в разделе 2.3, тройственный отклик колбочек обрабатывается нейронами сетчатки. Результатом обработки является *цветоразностный (оппонентный) сигнал*, отправляемый по волокнам зрительного нерва в высшие отделы головного мозга. Оппонентные сигналы можно представить как:

$$C_1 = \rho_A - \gamma_A$$
$$C_2 = \gamma_A - \beta_A$$
$$C_3 = \beta_A - \rho_A$$

Однако, разумеется, существуют и три дополнительных варианта:

$$C_1' = \gamma_A - \rho_A$$
$$C_2' = \beta_A - \gamma_A,$$
$$C_3' = \rho_A - \beta_A$$

но для простоты мы ограничимся лишь первыми тремя.

Напомним, что те стимулы, в восприятии которых отсутствует цветовой тон (белые, серые и черные), называются *ахроматическими*. Как было показано в разделе 2.5, критерием ахроматичности стимула является равенство колбочковых откликов на него:

$$\rho_a = \gamma_a = \beta_a,$$

и, следовательно, —

$$C_1 = C_2 = C_3 = 0$$

Понятно, что чем более величины C_1, C_2 и C_3 удаляются от нуля, тем выше полнота цвета стимула.

Понятно также, что критерием постоянства цветового тона является:

$$C_1/C_2/C_3 = \text{const}$$

35.8 ЭФФЕКТЫ ЯРКОСТНОЙ АДАПТАЦИИ

На рис. 35.4 величины ρ_a даны как функция от $\lg(5L_A\,\rho/\rho_w) = \lg I$, где ρ_w — это отклик ρ-колбочек на тестовый белый стимул. Если $5L_A$ — это фотометрическая яркость белого стимула, а тестируемый образец при этом имеет ту же цветность, то выражение $5L_A\,\rho/\rho_w$ будет равно фотометрической яркости образца. Кривые рис. 35.4 даны по

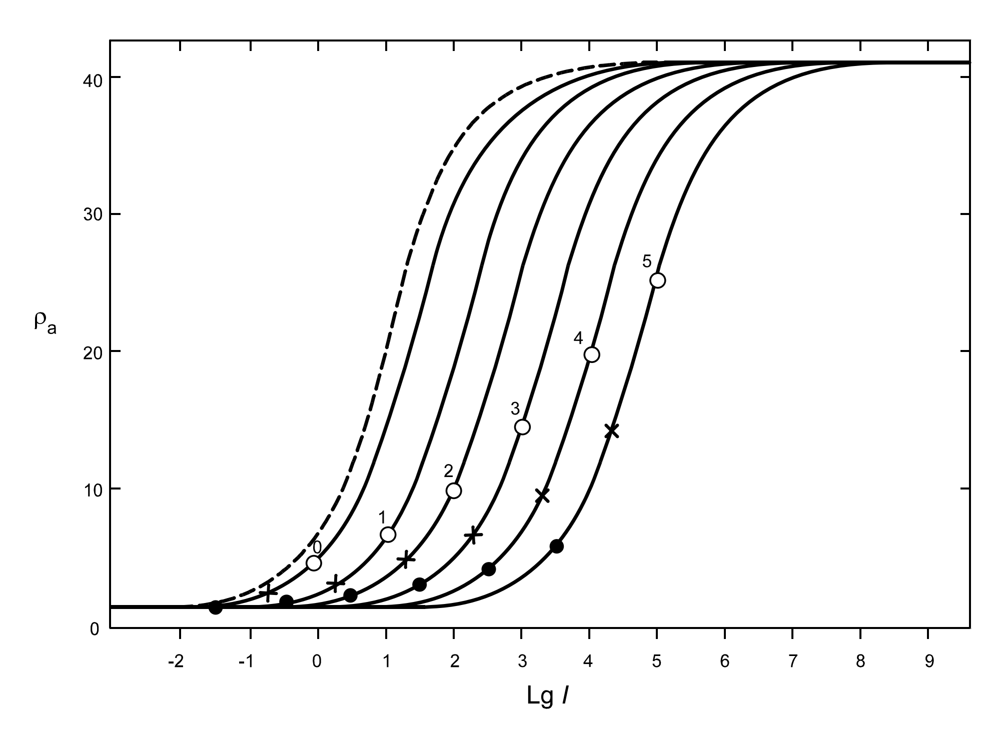


Рис. 35.4 Отклики ρ-колбочек как функции от LgI (где $I = 5L_A\,\rho/\rho_w$, а L_A — фотометрическая яркость адаптирующего поля в кд/м^2) при пяти уровнях lg($5L_A$), равных 5, 4, 3, 2, 1 и 0 логарифмированных кд/м^2 (сплошные линии), а также при темновой адаптации (пунктирная линия). *Белые кружки*: тестовый белый. *Черные кружки*: 3.162% черного. *Крестики*: адаптирующее поле (фотометрическая яркость равна 1/5 от яркости тестового белого).

значениям lg($5L_A$), равным 5, 4, 3, 2, 1 и 0 (сплошные линии), а также при темновой адаптации (пунктирная линия).

Давайте рассмотрим кривую «3», относящуюся к lg($5L_A$) = 3: белый кружок на кривой относится к стимулу, имеющему то же значение ρ/ρ_w, что и у тестового белого, а черный кружок — к стимулу, по которому ρ/ρ_w равно 0.03162 от ρ/ρ_w по тестовому белому (что на 1.5 единицы ниже 3 по логарифмической шкале). Позиция адаптирующего стимула (стимула, создаваемого адаптирующим полем) — L_A, фотометрическая яркость которого равна 1/5 (20% — на 0.7 ниже 3 по логарифмической шкале) фотометрической яркости белого, обозначена крестиком. При этом сразу отметим, что аналогичные рассуждения применимы к γ_a и β_a.

Следовательно, когда lg($5L_A$) = 3, тестовый белый оказывается представлен прозрачным кружком в одной и той же позиции на всех трех ργβ-кривых, а стимул с той же цветностью и с фотометрической яркостью, составляющей 0.03162 от яркости тестового белого, — черным кружком в одной и той же позиции на всех трех графиках.

Таким образом, участок кривой «3» между прозрачным и черным кружками представляет диапазон стимулов между белым (точнее, белым при данном статусе адаптации — т. е. тестовым белым) и черным, фотометрическая яркость которого составляет 3.162% от фотометрической яркости тестового белого (когда lg($5L_A$) = 3 логарифмированным кд/м^2).

Остальные кривые на рис. 35.4 представляют аналогичные диапазоны стимулов при прочих величинах lg($5L_A$): мы видим, что диапазоны эти прогрессивно уменьша-

ются в левом направлении и растут в правом. Отметим, что физиологи в своих отчетах приводят целые семейства аналогичных кривых (Valeton и Van Norren, 1983).

S-образная форма обсуждаемых кривых свидетельствует о том, — а в контексте моделирования результатов цветового восприятия — прогнозирует то, что полнота цвета стимулов одной и той же цветности падает по мере падения коэффициента их фотометрической яркости (и наоборот). Действительно, если обратиться к рис. 35.5, то мы вновь увидим кривую «3», но с вертикальными пунктирными линиями, относящимися к трем красным стимулам одной общей цветности, но разных фотометрических яркостей. О постоянстве цветности этих стимулов свидетельствуют одинаковые расстояния (0.5) по оси $\lg I$ между позициями колбочковых поглощений излучения ($\rho > \gamma$ и β; $\gamma = \beta$).

По мере снижения фотометрической яркости позиции на $\lg I$-оси смещаются влево. Исходом является смещение позиций откликов в участок кривой с меньшим наклоном. Следовательно, отличие между ρ_a- и γ_a-откликами снижается, и, разумеется, снижается оппонентный сигнал C_1 (C_3 будет снижаться аналогично), что, как было показано ранее, влечет за собой снижение полноты цвета стимула. Таким образом, если при данной цветности стимула падает его фотометрическая яркость — падает и полнота цвета этого стимула (что полностью подтверждается практикой).[1]

Вернемся к рис. 35.4. Если фотометрическая яркость адаптирующего стимула[2] (L_A) падает, кривые смещаются влево, указывая на рост чувствительности сетчатки. Однако последнее не может обеспечить полной компенсации, и, следовательно, падает субъективная яркость стимула тестируемого. Мы видим также, что позиции точек, представляющих тестовый белый стимул (○), адаптирующий (×) и черный (●) плавно смещаются в область меньшего наклона кривой. Сие ведет к сокращению отличий в откликах на белый, адаптирующий и черный стимулы. У хроматичных стимулов при этом, напомним, падает их полнота цвета.

Сказанное выше проиллюстрирует рис. 35.6, на котором даны кривые 1, 3 и 5 из рис. 35.4: вертикальные линии в точке пересечения с кривой «5» указывают на то, какова величина $\lg I$ по ρ-отклику на красный стимул при его фотометрической яркости, равной фотометрической яркости белого (то же по γ- и β-откликам, на 0.5 логарифмических единиц меньшим). Соответствующее значение оппонентного отклика C_1 дано слева. Хорошо видно, что у кривых «1» и «3» величины C_1 ощутимо меньше (что также касается и C_3-оппонентных откликов).

Итак, CIECAM97s прогнозирует эффект потери полноты цвета стимулов по мере снижения уровня освещенности (что полностью подтверждается практикой).

Из рис. 35.6 также видно, что наклон кривых возле черной точки (l) слабеет по мере смещения кривых влево. Сие указывает на то, что CIECAM97s эффективно прогнозирует снижение различимости темных стимулов при тусклом освещении (и что также полностью подтверждается практикой).

Наконец, отметим, что кривые рис. 35.4, 35.5 и 35.6 демонстрируют также и то, что по стимулам, фотометрическая яркость которых много больше, чем у тестового белого, колбочковые отклики приближаются к максимально возможному уровню, что также влечет за собой снижение полноты цвета этих стимулов.

---

1 Автор скромно умалчивает, что данный феномен именуется «эффектом Ханта» (Fairchild, 2004). — *Прим. пер.*

2 Адаптирующий стимул — интегральный стимул, созданный адаптирующим полем.

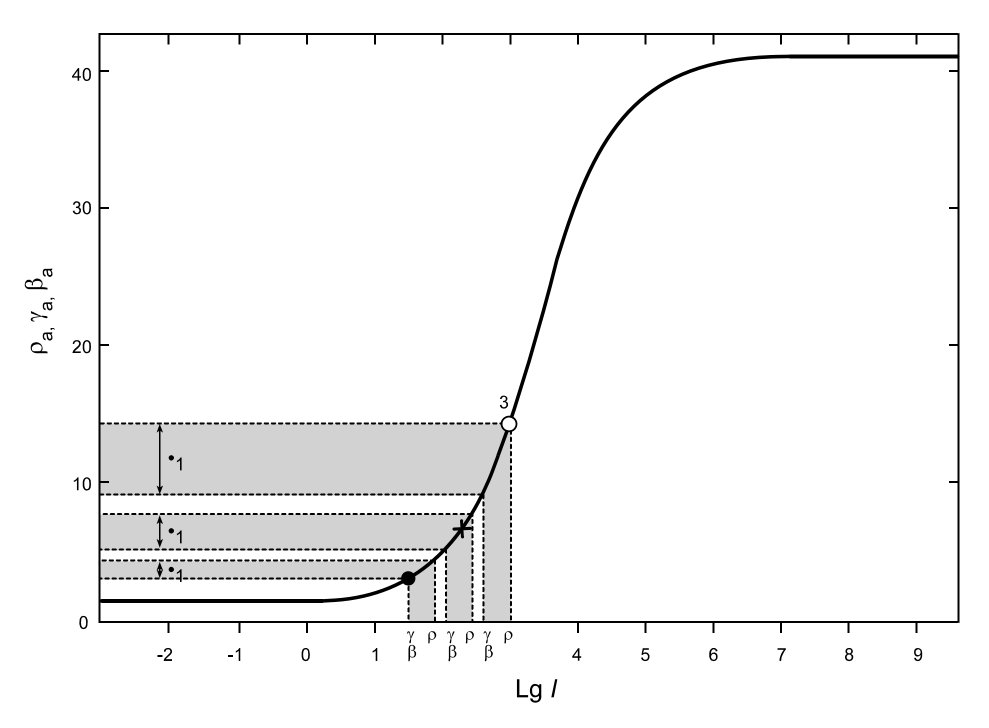


Рис. 35.5 Кривая «3» (из рис. 35.4), на которой даны позиции стимулов одной цветности, но трех разных фотометрических яркостей. Хорошо видно, что по мере снижения фотометрической яркости стимула оппонетный отклик на него падает.

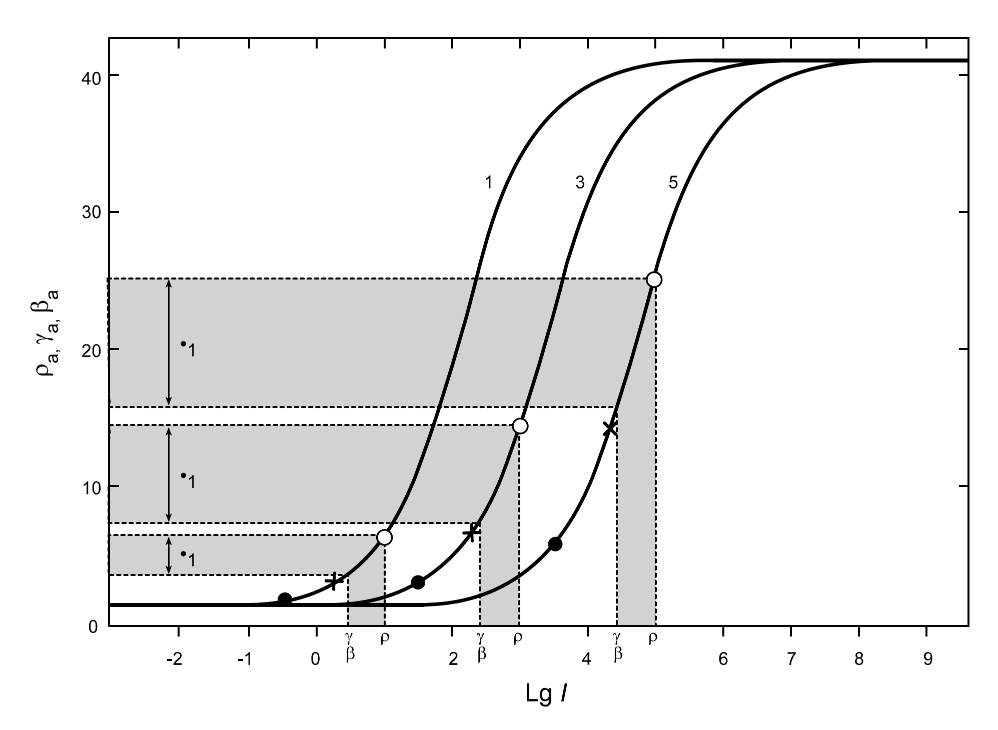


Рис. 35.6 Кривые «1», «3» и «5» (из рис. 35.4), на которых отмечены позиции стимулов одной цветности и одной фотометрической яркости при трех разных уровнях яркости адаптирующего стимула (допущено, что фотометрическая яркость тестового белого во всех трех случаях в 5 раз выше яркости адаптирующего поля). Хорошо видно, что по мере снижения яркости адаптирующего поля оппонентный отклик на исследумый стимул также падает.

35.9 КРИТЕРИИ ОДНОЗНАЧНОСТИ ЦВЕТОВЫХ ТОНОВ

Мы помним, что существуют четыре однозначных цветовых тона: красный, зеленый, желтый и синий. CIECAM97s позиционирует эти тона исходя из постоянства отношения C_1 к C_2 либо к C_3 (поскольку $C_1 + C_2 + C_3 = 0$, то, ежели одно из этих соотношений постоянно, и остальные тоже будут постоянными, и нет необходимости в дополнительной спецификации).

Однозначный красный	$C_1 = C_2$
Однозначный зеленый	$C_1 = C_3$
Однозначный желтый	$C_1 = C_2/11$
Однозначный синий	$C_1 = C_2/4$

На рис. 35.7 сплошными линиями отмечены предикторы, полученные исходя из данных критериев, по стимулам, предъявляемым на высоких уровнях яркости адаптирующего стимула (L_A = 200 кд/м[2] при С-осветителе); в подтверждение эффективности модели приведены пунктирные линии, полученные экспериментальным путем с использованием системы NCS (см. раздел 8.12).

35.10 КРАСНОВАТОСТЬ-ЗЕЛЕНОВАТОСТЬ И ЖЕЛТОВАТОСТЬ-СИНЕВАТОСТЬ

Когда речь идет о красных оттенках, условием однозначности красного тона является $C_1 = C_2$. Отклонение от этого условия ведет к появлению в красном либо желтого чувственного компонента (нарастание желтоватости), либо синего (нарастание синеватости). И первое, и второе указывает на усиление неравенства между C_1 и C_2, то есть на то, что разность между оппонентными откликами C_1 и C_2 начинает удаляться от ноля (отметим, что C_1 вычитается из C_2, чтобы на нарастание желтизны указывали положительные значения).

Аналогично, так как условием однозначности зеленого тона является $C_1 = C_3$, на нарастание желтоватости или синеватости в зеленых укажет отклонение $C_1 - C_3$ от ноля (при нарастании желтизны в область положительных значений). Следовательно, мера желтизны или синевы красных и зеленых тонов будет представлять собой среднее арифметическое между двумя разностями:

$$\frac{C_2 - C_1 + C_1 - C_3}{2},$$

что равно $0.5(C_2 - C_3)$.

Аналогичные рассуждения применимы к красноватости/зеленоватости желтых и синих стимулов. Однако коль скоро однозначный желтый чувственно оценивается более интенсивным, чем однозначный синий (Kuehni, 2004), то среднее арифметическое в этом случае неприменимо, и красноватость/зеленоватость желтых и синих стимулов выражается как:

$$C_1 - (C_2 / 11) = a$$

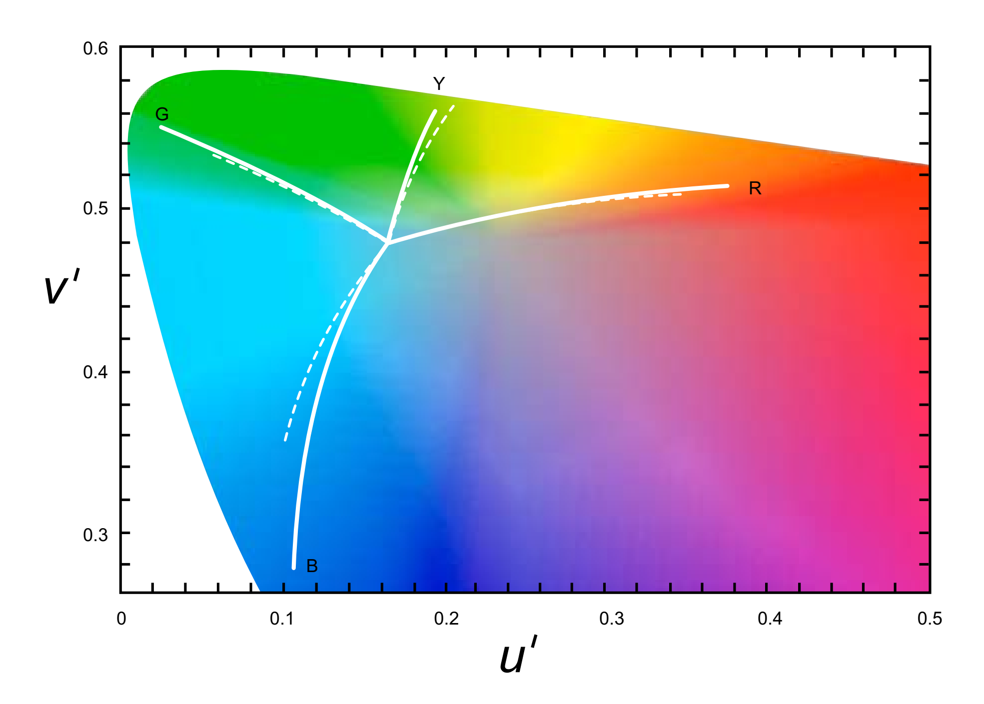


Рис. 35.7 *Сплошные линии*: локусы однозначных цветовых тонов, спрогнозированные CIECAM97s при фотометрической яркости адаптирующего поля 200 кд/м². *Пунктирные линии*: локусы однозначных цветовых тонов в системе NCS при Стандартном С-осветителе. Чтобы гарантировать «попадание» постадаптационных колбочковых откликов (ρ_a, γ_a, β_a) на линейный участок кривой рис. 35.2, выражение $\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a$ положено равным 30. То же выражение по идеальному отражающему рассеивателю — 43. Поскольку (как показано на рис. 35.2) гиперболическая функция в своем центральном участке аппроксимирует простую степенную функцию, цветности, соответствующие локусам постоянного цветового тона, лишь слегка зависимы от $\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a$, что и гарантирует «попадание» ρ_a, γ_a и β_a в центральный участок кривой.

По NCS фотометрические яркости были максимально допустимыми системой.

Теперь нам необходимо объединить корреляты желтоватости/синеватости и красноватости/зеленоватости, дабы получить метрику цветового тона. Однако прежде напомним, что общее количество β-колбочек в сетчатке составляет всего лишь 1/20 от суммы ρ- и γ-колбочек (Warlaven и Bouman, 1966). Если рассуждать в контексте соотношения «полезный сигнал/шум», то становится понятным, что желто-синий оппонентный сигнал сетчатки должен обладать меньшим весом, нежели сигнал красно-зеленый. С целью учета сего обстоятельства CIECAM97s использует коэффициент 1/4.5 (примерно равен $\sqrt{1/20}$), в результате чего желтоватость-синеватость выражается как:

$$1/2(C_2 - C_3)/4.5 = b$$

35.11 УГОЛ ЦВЕТОВОГО ТОНА

Количественным показателем цветового тона (*hue*) является, как мы знаем, его угол h:

$$h = \arctan(b/a)$$

Угол цветового тона ляжет между 0° и 90°, если a- и b-значения положительны; между 90° и 180° — если a-значение отрицательно, а b — положительно; между 180° и 270° — если a- и b-значения отрицательны; между 270° и 360° — если a-значение положительно, b — отрицательно.

35.12 КОРРЕЛЯТ ЧИСТОТЫ ЦВЕТА

Мы знаем, что полнота цвета — это перцепционный показатель, являющийся мерой выраженности цветового тона и, следовательно, мерой желтоватости/синеватости и красноватости/зеленоватости. Однако, прежде чем (с целью расчета величины коррелята полноты цвета) мы объединим a- и b-показатели, необходимо поговорить о таких перцепционных переменных, как *чистота цвета* (*saturation*) и *насыщенность* (*chroma*).

35.12.1 Коэффициент эксцентричности

Необходимость в коэффициенте e — т.н. *коэффициенте эксцентричности* (оригинальности) продиктована эксцентричностью позиции ахроматической точки внутри контуров малой постоянной чистоты цвета (Hunt, 1985). Ахроматическая точка прогрессивно стремится к этим контурам, если цветовой тон стимула меняется от желтого к красному и от зеленого к синему. Сие указывает на усиление ощущения хроматичности по мере изменения цветового тона в направлениях желтый → красный и зеленый → синий. Чтобы учесть сие свойство восприятия, коэффициенту эксцентричности присвоены следующие значения по однозначным цветовым тонам, углы которых (полученные из $C_1/C_2/C_3$) равны:

	Красный	Желтый	Зеленый	Синий
h	20.14	90.00	164.25	237.53
e	0.8	0.7	1.0	1.2

Значения e на промежуточных цветовых тонах линейно интерполируются по уравнению:

$$e = e_1 + (e_2 - e_1)(h - h_1)/(h_2 - h_1),$$

где e_1 и h_1 — это соответственно e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее меньшее значение h, а e_2 и h_2 — e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее наибольшее значение h.

На рис. 35.8 e дано как функция от h.

35.12.2 Коэффициент шума

В CIECAM97s введен коэффициент 10/13, учитывающий межканальный шум системы (Hunt, 1982).

35.12.3 Коэффициент хроматической индукции окружения

CIECAM97s задействует также т.н. *коэффициент хроматической индукции окружения* (N_c), позволяющий учесть тот факт, что тусклое или темное окружения исследуемого стимула могут понизить полноту его цвета.

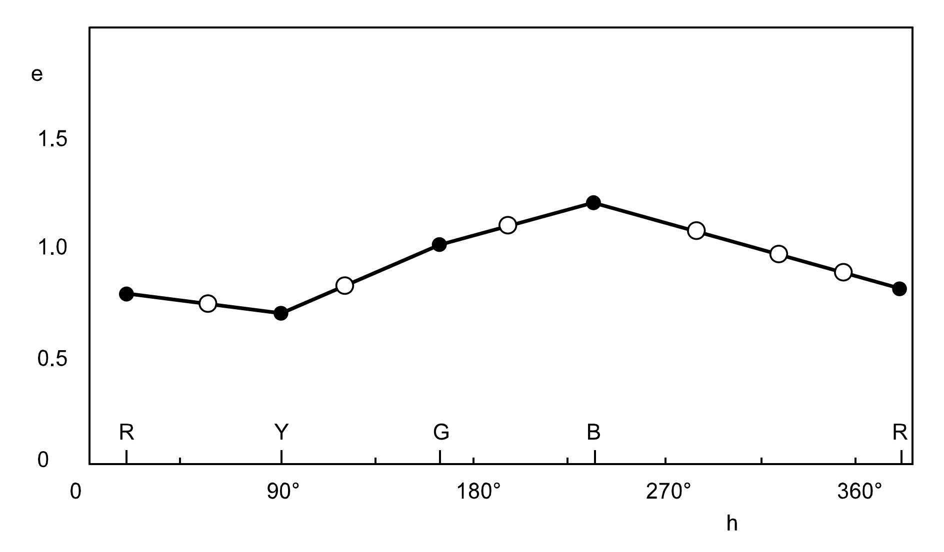


Рис. 35.8 Коэффициент эксцентричности (e) как функция от угла цветового тона (h).

35.12.4 Коэффициент хроматической индукции фона

Дабы учесть то, что (в сравнении с серым фоном) полнота цвета исследуемого стимула снижается на светлых фонах и растет на темных (MacDonald, Luo и Scrivener, 1990; Hunt, 1994), в модель введен т.н. *коэффициент хроматической индукции фона* (N_{cb}), вычисляемый по уравнению:

$$N_{cb} = 0.725/n^{0.2},$$

где $n = Y_b / Y$, а Y_b и Y — это коэффициенты фотометрической яркости соответственно фона и тестового белого. Если $Y_b / Y = 1/5$ (т. е. фотометрическая яркость фона составляет 20% от фотометрической яркости тестового белого), то $N_{cb} = 1$. Сразу отметим, что когда цветность фона отлична от цветности тестового белого, вместо Y_b и Y_w используется Y-значения согласованных стимулов — Y_{cb} и Y_{cw}).

35.12.5 Чистота цвета

Таким образом, коррелят чистоты цвета (s) рассчитывается по уравнению:

$$s = \frac{\sqrt{50(a^2 + b^2)}100e(10/13)N_c N_{cb}}{\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a},$$

где «50» и «100» — это константы, приводящие результат к удобному диапазону величин.

Поскольку чистота цвета стимула позиционирована CIE как полнота его цвета отнесенная к его же субъективной яркости (см. раздел 7.2), то можно предположить, что s следовало бы высчитывать делением показателей желтоватости/синеватости и красноватости/зеленоватости на величину перцепционного коррелята субъективной яркости. Однако, как показала практика, чистота цвета хроматических стимулов успешно прогнозируется делением на $\rho_a + \gamma_a + \beta_a$. При этом в CIECAM97s использовано несколько иное выражение ($\rho_a + \gamma_a + [21/20]\beta_a$) и тому есть две причины:

— во-первых, физиологической подоплекой чистоты цвета является нейронное сравнение ахроматического отклика зрительной системы с суммой цветоразностных (оппонентных) откликов, что будет показано в разделе 35.15 и что описывается выражением $\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a$;

— во-вторых, применение $\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a$ вместо $\rho_a + \gamma_a + \beta_a$ существенно облегчает инверсию модели.

35.13 КОРРЕЛЯТЫ ЦВЕТОВОГО ТОНА

В левой части рис. 35.9 b-значения, вычисляемые, напомним, по уравнению $1/2(C_2 - C_3)/4.5 = b$ даны как функция от a-значений, вычисляемых по уравнению $C_1 - (C_2/11) = a$. На данной фигуре величина h — это угол между горизонтальной линией, выходящей из центра координат вправо, и линией, соединяющей центр координат с точкой, представляющей позицию исследуемого стимула. Позиции однозначных цветовых тонов показаны на диаграмме сплошными линиями «R», «Y», «G» и «B».

35.13.1 Квадратура цветового тона

CIECAM97s позволяет выразить цветовой тон в показателях т.н. *квадратуры цветового тона* (H), представляющей собой условные ментальные «доли» однозначных цветовых тонов в цветовом тоне исследуемого стимула:

$$H = H_1 + \frac{100(h - h_1)/e_1}{(h - h_1)/e_1 + (h_2 - h)/e_2},$$

где H_1 — это 0, 100, 200, либо 300, согласно однозначным красному, желтому, зеленому и синему соответственно, а h — величина однозначного цветового тона, имеющего ближайшее наименьшее значение к цветовому тону исследуемого стимула.

Разницу между углом цветового тона и квадратурой цветового тона иллюстрирует рис. 35.9: первое показано слева, второе — справа. Пунктирными линиями показаны угловые позиции линий, представляющих цветовые ощущения, лежащие посередине между соседними однозначными цветовыми тонами, то есть ощущения, которые оцениваются наблюдателем как состоящие из равнодолевой их «смеси».

Обратим внимание на то, что угловые пространства между пунктирными линиями и линиями однозначных цветовых тонов не равновелики из-за разной перцепционной значимости однозначных красного, желтого, зеленого и синего (квадрант красно-синих тонов на диаграмме цветностей, скажем CIELUV, будет больше, чем все остальные квадранты, поэтому в нашем рисунке он разделен на четыре перцепционно-равномерных интервала).

Когда речь идет о квадратуре цветового тона (на рис. справа), эффект перцепционной значимости однозначных цветовых тонов учитывается на стадии расчета H-величины, и, следовательно, пунктирные линии находятся на равных угловых расстояниях друг от друга. Однако поскольку однозначные красный и зеленый расположены строго друг против друга, однозначные желтый и синий тоже строго друг против друга, но под прямым углом к линии первых двух, то образуемые четыре квадранта не представляют равных перцепционных интервалов цветового тона: если перцепционное отличие между однозначными красным и желтым, желтым и зеленым, а также зеленым и синим не столь уж велико, то отличие между однозначным синим и однознач-

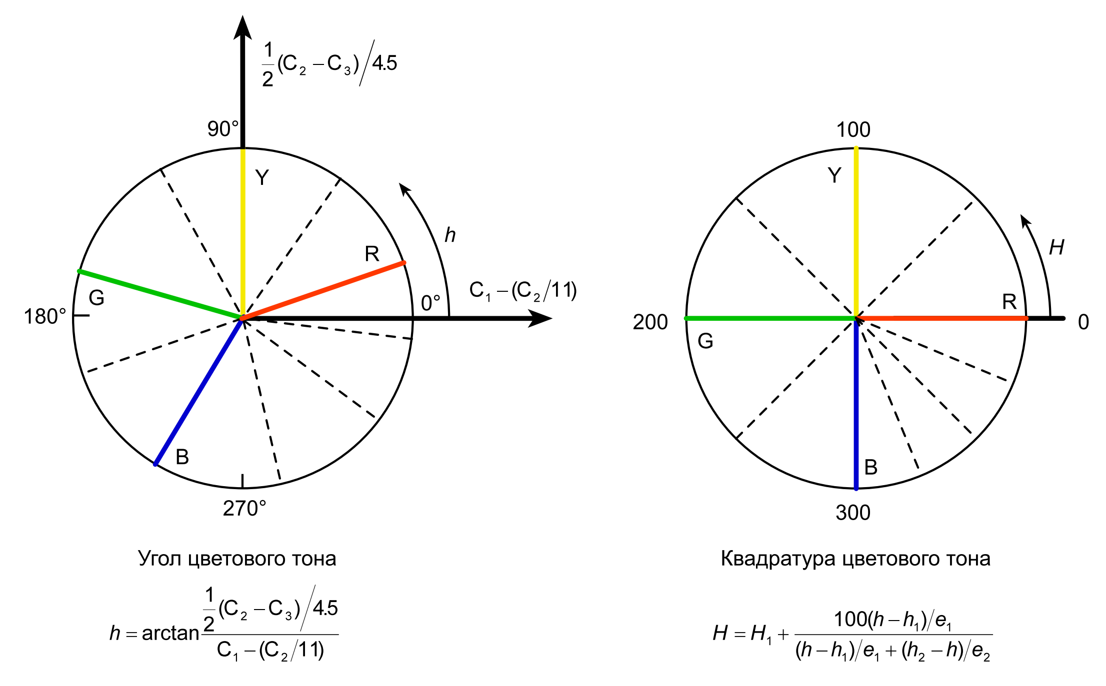


Рис. 35.9 *Слева*: угол цветового тона (h) в осях $1/2(C_2 - C_3)/4.5 = b$ (желтоватость/синеватость) и $C_1 - (C_2/11) = a$ (красноватость/зеленоватость). Квадратура цветового тона (H) в перпендикулярных друг другу осях, где однозначный красный лежит строго против однозначного зеленого, а однозначный желтый — строго против однозначного синего.

ным красным вдвое больше, что отмечено тремя пунктирными линиями. Однако, угол цветового тона (слева) представляет перцепционные отличия более равномерно: угловые расстояния на рис. слева примерно те же, что и у манселловской системы, тогда как квадратурное представление цветового тона на рис. справа более схоже с шагами цветовых тонов системы NCS.

Наконец, отметим, что величину H можно выразить как в виде числа, так и в виде т.н. *состава цветового тона* (H_C), представляющего собой процентные доли условной смеси двух соседних однозначных цветовых тонов, «образующей» цветовой тон исследуемого стимула. Если одно из значений превышает 50, сие означает, что такой-то однозначный цветовой тон «доминирует» (старший), а второй однозначный цветовой тон является второстепенным (младший). К примеру, если $H = 262$, состав данного цветового тона равен 62 однозначного синего (blue) и 38 однозначного зеленого (green), что обозначается как 62B 38G.

Если одно из значений меньше 50, оно представляет младший однозначный цветовой тон, а оставшийся процент является старшим. К примеру, если $H = 231$, то состав цветового тона исследуемого стимула окажется равным 69 однозначного зеленого (green) и 31 однозначного синего (blue) — 69G 31B.

35.14 СРАВНЕНИЕ С NCS

На рис. 35.10 сплошными линиями показаны локусы постоянного цветового тона и чистоты цвета, прогнозируемые CIECAM97s на высоких уровнях фотометрической яркости адаптирующего поля ($L_A = 200$ кд/м²); пунктирные линии демонстрируют результаты, полученные экспериментально с помощью шведской национальной систе-

мы естественных цветов (NCS). Мы видим, что оба набора линий достаточно близки друг другу.

35.15 АХРОМАТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК

В дополнение к оппонентным (цветоразностным) сигналам сетчатка посылает в головной мозг *сигнал ахроматический*. Фотопическую долю ахроматического сигнала CIECAM97s рассчитывает по выражению:

$$2\rho_a + \gamma_a + (1/20)\beta_a - 3.05 + 1$$

исходя из того, что заселенность центральной ямки сетчатки составляет 2:1:1/20 соответственно (Walraven и Bouman, 1966). Сумма физиологических шумов по каждому типу колбочек в отдельности (3.05) подправлена единицей. Таким образом, полный ахроматический отклик зрительной системы моделируется уравнением:

$$A = \left[2R'_a + G'_a + (1/20)B'_a - 2.05\right]N_{bb},$$

где N_{bb} — это коэффициент, позволяющий учесть влияние на результат субъективной яркости фона (*коэффициент субъективнояркостной индукции фона*); $N_{bb} = 1$, если $Y_b / Y_w = 0.2$ (т.е. если фотометрическая яркость фона составляет 20% от фотометрической яркости тестового белого). В общем виде:

$$N_{BB} = 0.725(1/n)^{0.2},$$

где $n = Y_b / Y_w$ (либо $n = Y_{bc} / Y_{wc}$, если цветность фона отлична от цветности тестового белого). Результирующий отклик (т.е. ахроматический отклик, объединенный с откликами оппонентными) можно рассчитать так (исключив при этом физиологический шум и приравняв N_{bb} к 1):

$$A + \frac{(C'_1 + C'_2 + C'_3)}{2},$$

что эквивалентно $2\rho_a + \gamma_a + (1/20)\beta_a$ (выражение «$C_1 + C_2 + C_3$» использовать нельзя, т.к. оно равно нулю).

35.16 КОРРЕЛЯТ СВЕТЛОТЫ

Светлота — это субъективная яркость стимула, оцененная по отношению к субъективной яркости тестового белого (т.е. стимула, воспринимаемого как белый при данном статусе адаптации). Следовательно, светлота определяется как функция отношения ахроматического отклика на согласованный стимул к ахроматическому отклику на тестовый белый. Расчет построен таким образом, что показатель светлоты зависит также от коэффициента фотометрической яркости фона и характера окружения. Результирующее уравнение выглядит следующим образом:

$$J = 100(A/A_W)^{cz},$$

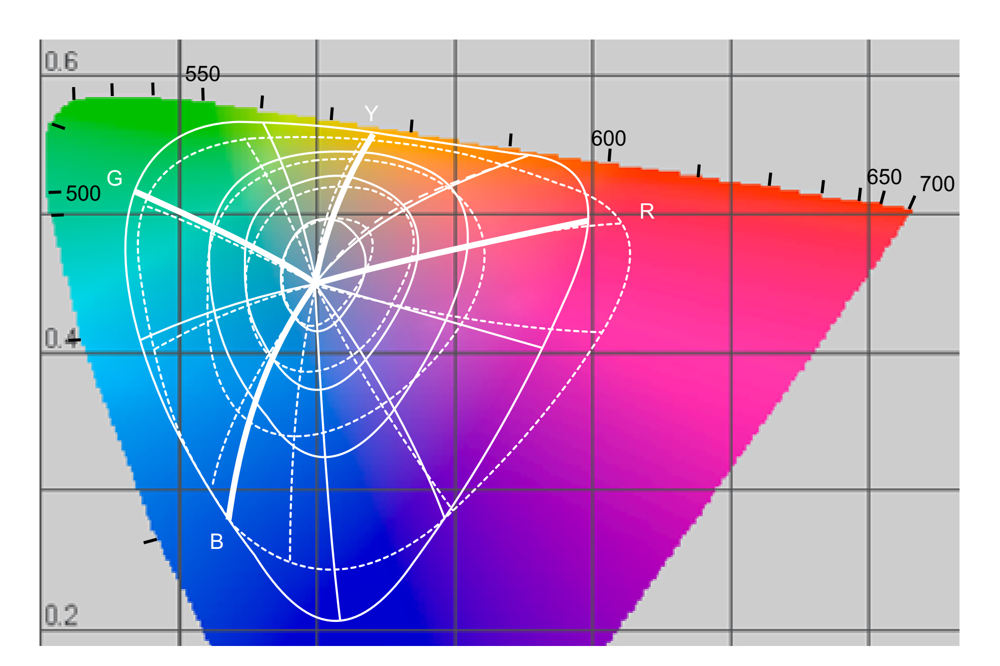


Рис. 35.10 Локусы постоянных цветовых тонов и контуры постоянной чистоты цвета (сплошные линии), спрогнозированные CIECAM97s, в сравнении с таковыми у NCS при стандратном С-осветителе (пунктирные линии). Локусы однозначных цветовых тонов отмечены как R, Y, G и B. Промежуточные локусы делят каждый квадрант на перцепционно-равные интервалы цветового тона. Контуры постоянной чистоты цвета (s), предсказанные CIECAM97s, соответствуют следующим ее величинам: 60, 120, 180 и 320. Контуры постоянной хроматичности (c) системы NCS: 30, 50,70 и 90.
Параметры прогноза CIECAM97s следующие:
— фотометрическая яркость адаптирующего поля 200 кд/м^2;
— $N_c = N_b = 1$;
— выражение $\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a$ положено равным 30. То же выражение по идеальному отражающему рассеивателю — 43. Поскольку (как показано на рис. 35.2) гиперболическая функция в своем центральном участке аппроксимирует простую степенную функцию, то цветности, соответствующие локусам постоянного цветового тона лишь слегка зависимы от $\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a$, что и гарантирует «попадание» ρ_a, γ_a и β_a в центральный участок кривой.

По NCS фотометрические яркости были максимально допустимыми системой.

где c = 0.69 при среднем окружении, 0.59 при тусклом, 0.525 при темном и 0.41 при просмотре листовых слайдов на столике задней подсветки; показатель z вычисляется по формуле:

$$z = 1 + F_{LL} n^{1/2},$$

где $n = Y_b / Y_w$ (либо $n = Y_{bc} / Y_{wc}$, если цветность фона отлична от цветности тестового белого), а $F_{LL} = 1.0$, за исключением стимулов, угловой размер которых превышает 4° (в этом случае $F_{LL} = 0$).

35.17 КОРРЕЛЯТ СУБЪЕКТИВНОЙ ЯРКОСТИ

Коррелят субъективной яркости в CIECAM97s позиционируется как коррелят светлоты (J) умноженный на функцию ахроматического отклика на тестовый белый

стимул (A_w), что привязывает получаемые значения к уровню фотометрической яркости:

$$Q = (1.24/c)(J/100)^{0.67}(A_W + 3)^{0.9}$$

На рис. 35.11 десятичный логарифм Q (lg$Q$) дан как функция от десятичного логарифма фотометрической яркости (LgL) при среднем окружении. Результирующие величины по $5L_A$, равным 100000, 10000, 1000, 100, 10 и 1 кд/м^2 на логарифмической шкале, равны соответственно 5, 4, 3, 2, 1 и 0. Результирующие величины по отношению L/L_w (где L_w — это значение L по тестовому белому), равному 1.0, 0.3162, 0.1, 0.03162 и 0.001 соответствуют оптическим плотностям: 0, 0.5, 1.0, 1.5 и 2.0.

Итак, рис. 35.11 говорит нам о следующем:

— во-первых, о том, что субъективная яркость падает по мере снижения уровня освещенности;

— во-вторых, наклон «вертикальных» линий, представляющих серые шкалы, понижен у темных стимулов на низких уровнях освещенности и у светлых стимулов на высоких уровнях;

— в-третьих, наклон «горизонтальных» линий, представляющих постоянную величину L/L_w на серых шкалах, примерно везде одинаков и указывает на то, что светлота при разных уровнях освещенности более или менее константна. Однако же при снижении уровня освещенности имеет место плавная конвергенция линий, что указывает на относительный рост светлоты темных стимулов по мере снижения уровня освещенности;

— в-четвертых, равные интервалы на оси ординат представляют равные отличия в субъективной яркости.

Наконец, отметим, что сходные результаты (но в радикально меньшем диапазоне фотометрических яркостей) были получены Джеймсоном и Гурвичем в экспериментах по психометрическому шкалированию и моделированию (Jameson и Hurvich, 1964).

35.18 КОРРЕЛЯТЫ НАСЫЩЕННОСТИ И ПОЛНОТЫ ЦВЕТА

Расчет коррелята насыщенности (C) включает в себя учет зависимости этого показателя от n, а также от отношения фотометрической яркости фона (Y_b) к фотометрической яркости тестового белого (Y_w):

$$C = 2.44 s^{0.69}(J/100)^{0.67n}(1.64 - 0.29^n)$$

где s и J — это корреляты чистоты цвета и светлоты соответственно. Отношение $J/100$ (при данном значении s) позволяет *снижать* показатель насыщенности (C) по мере снижения фотометрической яркости исследуемого стимула. Степень $0.67n$ позволяет *повышать* значение насыщенности по мере снижения фотометрической яркости фона. Показатель 0.29^n позволяет моделировать инверсию обоих перечисленных эффектов у особо светлых стимулов.

Отметим, что при белых фонах (при которых $Y_b/Y_w = 1$) приведенное выше уравнение редуцируется до:

$$C = 2.44 s^{0.69}(J/100)^{0.67n}(1.35),$$

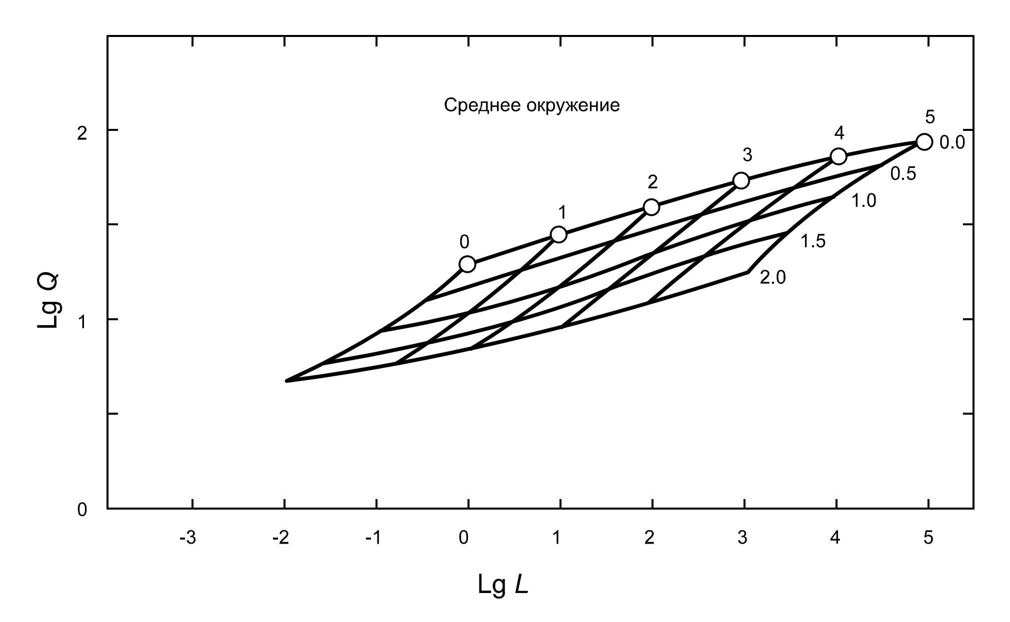


Рис. 35.11 График взаимоотношений между фотометрической яркостью стимула и его субъективной яркостью. Логарифм субъективной яркости (Log *Q*) дан как функция от логарифма фотометрической яркости в кд/м^2 (Log *L*). Зависимости даны при разных уровнях фотометрической яркости адаптирующего поля (в логарифмических единицах), а именно: $\log(5L_A) = 5, 4, 3, 2, 1$ и 0. Кривые, помеченные как «0», «0.5», «1.0», «1.5» и «2.0», — это кривые по образцам с соответствующими оптическими плотностями.

а при глубоко черных фонах ($Y_b/Y_w = 0$) до:

$$C = 2.44s^{0.69}(0.64)$$

Коррелят полноты цвета (*M*) вычисляется по уравнению:

$$M = CF_L^{0.15}$$

35.19 ТЕСТИРОВАНИЕ CIECAM97S

Прежде чем утвердить, CIE протестировала модель CIECAM97s следующими способами.

25.19.1 Два набора данных

В тестировании модели использовались два набора данных: данные, специфицирующие колориметрические показатели согласованных стимулов, и данные, специфицирующие результаты цветового восприятия стимулов в показателях психометрического шкалирования.

35.19.2 Наборы колориметрических данных

Напомним, что согласованными именуются те стимулы, что воспринимаются зрением одинаково в разных условиях просмотра (см. раздел 34.3). Спецификация пары

согласованных стимулов обычно представляет собой две тройки трехстимульных значений: первая тройка описывает меру и характер воздействия стимула на зрительную систему человека в первых условиях просмотра; вторая — меру и характер воздействия другого стимула, который, однако, во вторых условиях интерпретируется зрением точно так же, как и первый.

Наборы согласованных стимулов были получены из следующих источников:

— Color Science Association of Japan, CSAJ (Mori, Sobagaki, Komatsubara и Ikeda, 1991);

— исследований Хельсона (Helson, Judd and Warren, 1952);

— исследований Лэма и Ригга (Lam, 1985);

— исследований LUTCHI — Loughborough University of Technology Computer Human Interface Research Centre (Luo, Clarke, Rhodes, Schappo, Scrivener and Tait, 1991);

— исследований Куо и Луо (Kuo, Luo and Bez, 1995);

— исследований Бренемана (Breneman, 1987);

— исследований Мак-Канна (McCann, McKee and Taylor, 1987);

— исследований Марка Фершильда (Braun and Fairchild, 1996).

Психофизические методы получения данных о согласованных стимулах включали в себя:

— гаплоскопическое уравнивание (при котором сетчатка левого и правого глаз была адаптирована по-разному);

— сравнение по памяти;

— визуальную количественную оценку.

Способы воспроизведения стимулов:

— отражающие;

— самосветящиеся (на экранах мониторов);

— пропускающие (слайды).

Угловой размер образцов: 2° и 10°.

Диапазон освещенностей: от 10 до 38750 лк.

Фон: серый.

35.19.2.1 CSAJ-данные

CSAJ-данные были разделены на три группы:

— данные по исследованиям хроматической адаптации;

— данные по исследованиям хантовского эффекта (рост полноты цвета хроматического стимула по мере роста его фотометрической яркости — Hunt, 1950, 1952, 1953);

— данные по исследованиям эффекта Стивенса (рост субъективной яркости белых и понижение субъективной яркости черных стимулов по мере роста освещенности сцены — Stevens, 1961).

35.19.2.2 LUTCHI-данные

LUTCHI-данные были также разделены на три группы:

— данные по парам стимулов при тестовом A-имитаторе и эталонном D_{65}-имитаторе;

— при тестовом D_{50}-имитаторе и эталонном D_{65}-имитаторе;

— при тестовом люминесцентном освещении и эталонном D_{65}-имитаторе;

35.19.2.3 Данные Куо и Луо

Данные Куо и Луо:

— данные по парам стимулов при тестовом А-имитаторе и эталонном D_{65}-имитаторе;

— при тестовом трехполосном освещении лампами TL84 и эталонном D_{65}-имитаторе;

35.19.2.4 Данные Бренемана

Данные Бренемана:

— данные, полученные в экспериментах, где менялся состав стимулов и освещение;

— данные, полученные в экспериментах, где менялось только освещение, а состав стимулов оставался неизменным.

35.19.2.5 Данные Мак-Канна

Данные Мак-Канна:

— данные, полученные при красном, желтом, зеленом и синем источниках света.

Данные Фершильда:

— данные по отражающим отпечаткам и изображениям на экране монитора.

35.19.3 Данные результатов цветового восприятия

Результат цветового восприятия стимула можно шкалировать в показателях его цветового тона (hue), светлоты (lightness), субъективной яркости (brightness), насыщенности (chroma) и полноты цвета (colorfulness) путем назначения соответствующего числа по каждой из размерностей.

Цветовой тон можно выразить в виде условных процентных долей соседних однозначных цветовых тонов (однозначных красного, желтого, зеленого и синего).

Полноту цвета — как степень выраженности цветового тона, присвоив ноль ахроматичным цветам (белому, серому, черному) и любое подходящее положительное значение хроматическим.

Светлота выражается в виде числа на воображаемой шкале, в которой 100 соответствует эталонному белому, а 0 — самому глубокому черному.

На рис. 35.12 даны типичные результаты количественной оценки цветовых ощущений как функция от соответствующих прогностических показателей (*предикторов*) CIECAM97s.

Данные по результатам цветового восприятия были собраны LUTCHI (Luo, Clarke, Rhodes, Schappo, Scrivener и Tait, 1991; Luo, Gao, Rhodes, Xin, Clarke и Scrivener, 1993), а также Куо и Луо (Kuo, Luo и Bez, 1995) и содержат величины количественного психометрического шкалирования светлоты, субъективной яркости, полноты цвета и цветового тона, а также колориметрические данные соответствующих стимулов. Оба набора данных (психофизические и колориметрические) усреднены по группам из шести наблюдателей в каждой. В общей сложности было получено 100000 показателей в 48 вариантах экспериментальных условий.

Условия просмотра включали в себя освещение D_{65}-, D_{50}- и А-имитаторами, люминесцентными лампами, трехполосными люминесцентными лампами TL84 и ксеноновыми лампами. Угловые размеры стимуляции составляли 2° (мелкие образцы) и 10°

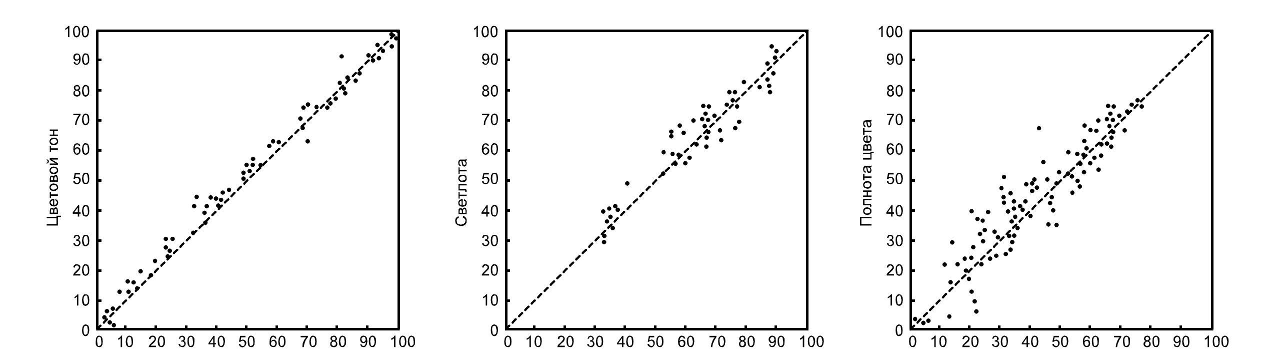


Рис. 35.12 Типичные примеры экспериментально шкалированных величин (ординаты). По осям абсцисс — предикторы CIECAM97s, рассчитанные по тем же стимулам и по тем же условиям просмотра, что и в экспериментах.

(крупные образцы). Уровни освещенности менялись от 1.3 лк до 6600 лк. Варианты фонов: белый, серый и черный.

Данные разделили на семь групп:

— по отражающим образцам, рассматривавшимся при высоких уровнях освещенности;

— по отражающим образцам, рассматривавшимся при низких уровнях освещенности;

— по отражающим образцам, рассматривавшимся при переменных уровнях освещенности;

— по крупным образцам;

— по самосветящимся образцам (на экранах мониторов);

— по листовым слайдам;

— по проекционным 35-мм слайдам.

35.19.4 Методы тестирования

35.19.4.1 По трехстимульным значениям

По данным о согласованных стимулах (содержащих трехстимульные значения по стимулам, предъявленным при тестовых условиях просмотра, а также трехстимульные значения стимулов, согласованных с первыми по визуальному ощущению, но предъявленных при эталонных условиях) тестовая процедура была следующей.

По каждой согласованной паре трехстимульные значения стимулов, предъявленных в тестовых условиях, конвертировались с помощью CIECAM97s в согласованные по «мнению» модели трехстимульные значения стимулов, предъявленных при эталонных условиях. Затем с помощью формулы цветовых отличий ΔE CMC (1:1) вычислялось отличие между расчетными трехстимульными значениями и значениями, полученными экспериментально. Наконец, средневзвешенные ΔE-значения, полученные по каждому из наборов умножением среднего ΔE по всем парам на количество пар в наборе, были суммированы и поделены на общее количество пар. Понятно, что по идеальной модели результат должен был бы быть равным нулю.

35.19.4.2 По перцепционным координатам

По данным результатов цветового восприятия (перцепционным данным), представляющим собой средние показатели светлоты, субъективной яркости, полноты цвета и цветового тона, а также по соответствующим трехстимульным значениям, тестовая процедура была следующей.

На основании трехстимульных значений стимулов модель прогнозировала величины светлоты, субъективной яркости, полноты цвета и цветового тона. Разность между экспериментальными данными (V) и предикторами модели (P) выражалась в виде коэффициентов изменчивости (CV), вычисляемых по уравнению:

$$\mathrm{CV} = 100\,\frac{\sqrt{\sum (V_\mathrm{i} - P_\mathrm{i})^2 / n}}{\sum (V_\mathrm{i}) / n},$$

где n — количество образцов, а i — конкретный образец со своим набором данных.

Предикторы светлоты и цветового тона сравнивались с экспериментальными данными напрямую.

К предикторам субъективной яркости подбирался некий шкалирующий коэффициент, который позволял аппроксимировать экспериментальные данные. То же выполнялось по прогностическим показателям полноты цвета.

В итоге умножением среднего значения CV по каждому набору данных на количество фаз в данном наборе, суммированием и последующим делением на общее количество фаз получали средневзвешенное CV-значение. Разумеется, в случае идеальной модели CV-значение должно быть равным нулю.

35.19.5 Результаты

Средневзвешенные результаты оказались следующими:

	CIECAM97s	Типичный наблюдательский разброс
ΔE по согласованным стимулам	4.8	4
ΔE по согласованным стимулам, но без данных Мак-Канна	4.2	4
CV по светлоте	11	13
CV по полноте цвета	19	18
CV по цветовому тону	7	8
CV по субъективной яркости	13	10

Результаты по согласованным стимулам приведены также за вычетом данных Мак-Канна, поскольку последние дали ощутимо больший разброс, чем остальные наборы. Дополнительно приведены отличия по единичному наблюдателю от соответствующих средних данных по группе из шести человек. Мы видим, что отличия эти весь-

ма схожи со средним отличием предикторов CIECAM97s от данных, полученных экспериментально.

Наконец, отметим, что поскольку данные психометрического шкалирования субъективной яркости были представлены лишь в материалах Бартлесона и Бренемана (Bartleson, 1980) по отражающим отпечаткам и проектированным слайдам (рис. 35.13 и 35.14), то, разумеется, тестирование модели шло в сравнении лишь с этими данными.

35.20 СЛАЙДЫ

Если всю поверхность слайда прикрыть равномерно окрашенным фильтром, то при проекционном показе он будет восприниматься как неприкрытый, поскольку наблюдатель очень легко адаптируется к хроматическому балансу проекционных изображений. Однако если прикрыть фильтром лишь какой-то один элемент изображения, то восприятие этого элемента изменится радикально.

Примером данного феномена может являться слайд, на котором изображена девушка в белой блузке, откинувшаяся на желтую подушку. Если весь слайд прикрыть голубым фильтром, то проекционное изображение этого слайда хоть и становится чуть-чуть «холоднее», но в целом выглядит так же, как и в нефильтрованном варианте. Но если фильтр прикрывает только подушку, то на проекционном изображении она выглядит зеленой.

CIECAM97s «умеет» прогнозировать такого рода эффекты, что проиллюстрирует следующая таблица:

	Подушка		Блузка	
	Состав цветового тона	Полнота цвета	Состав цветового тона	Полнота цвета
Слайд без фильтра	95Y 5R	42	73Y 27R	11
Подушка под фильтром	78G 22Y	47	73Y 27R	11
Слайд под фильтром	19G 81Y	44	9B 91G	15

Поскольку в данном эксперименте, вероятно, имеет место частичное ментальное обесцвечивание осветителя, D-показатель (степень хроматической адаптации) полагают равным $1/2\{1+F-F/[1+2(L_A^{1/4})+(L_A^2/300)]\}$.

35.21 ВЛИЯНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ ЭКРАНА НА КАЧЕСТВО ПРОЕКЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

CIECAM97s «умеет» прогнозировать влияние фотометрической яркости экрана на качество проекционных изображений — см. рис. 35.15, на котором также даны данные Бартлесона по субъективной яркости и полноте цвета элементов изображений (Bartleson, 1965).

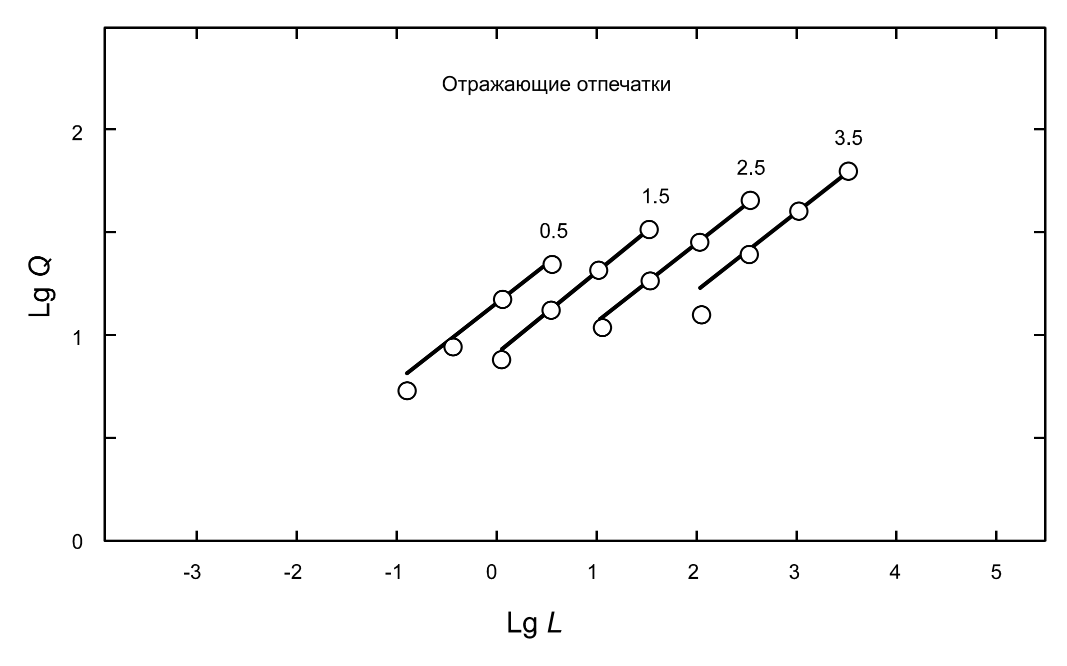


Рис. 35.13 Логарифм субъективной яркости (Log Q) предметного стимула как функция от логарифма его фотометрической яркости в кд/м^2 (Log L) при четырех уровнях освещенности, дающих фотометрические яркости тестового белого (в логарифмических единицах) соответственно: log(5L_A) = 3.5, 2.5, 1.5 и 0.5. *Кружки*: экспериментальные данные. *Линии*: предикторы CIECAM97s.

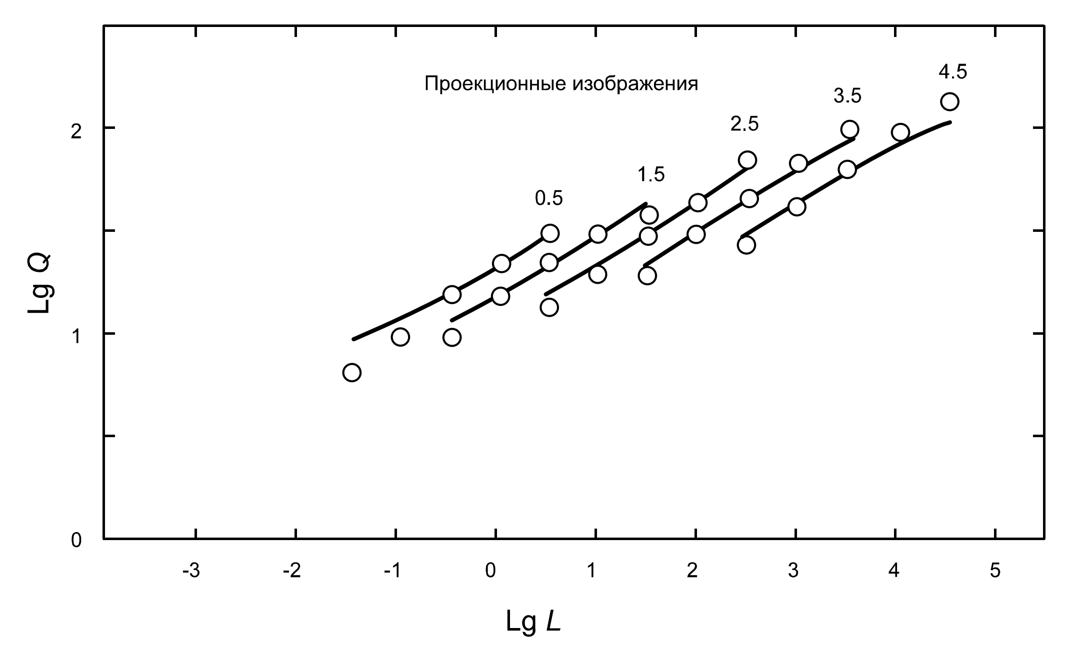


Рис. 35.14 То же, что и на рис. 35.13, но по элементам проекционных изображений со слайдов в темном просмотровом окружении при пяти вариантах фотометрической яркости экрана: log(5L_A) =4.5, 3.5, 2.5, 1.5 и 0.5, где 5L_A — это фотометрическая яркость тестового белого. *Кружки*: экспериментальные данные. *Линии*: предикторы CIECAM97s.

35.22 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ШАГОВ CIECAM97S

Входные данные модели:	Цветность		Фотометрическая яркость
Стимул от образца при тестовом освещении	x	y	Y
Опорный белый стимул при тестовом освещении (тестовый белый)	x_w	y_w	Y_w
Стимул, создаваемый фоном при тестовом освещении	x_b	y_b	Y_b
Опорный белый стимул при эталонном освещении (эталонный белый)	x_{wr}	y_{wr}	Y_{wr}
Фотометрическая яркость адаптирующего поля при тестовых условиях (кд/м^2) L_A	Обычно принимается равной 1/5 фотометрической яркости тестового белого		

Параметры окружения:	c	N_c	F_{LL}	F
Среднее окружение, образец захватывает >4°	0.69	1.0	0.0	1.0
Среднее окружение	0.69	1.0	1.0	1.0
Тусклое окружение	0.59	0.95*	1.0	0.9
Темное окружение	0.525	0.8	1.0	0.9
Листовые слайды (в просмотровом устройстве)	0.41	0.8	1.0	0.9

* В оригинале данное значение равно 1.1, но практика использования модели показала, что предпочтительным является 0.95 (Li, Luo и Hunt, 2000).

Параметры фона:

$$N_{BB} = N_{CB} = 0.725(1/n)^{0.2}$$

$$z = 1 + F_{LL} n^{1/2}, \text{ где } n = Y_b / Y_w$$

Если цветность фона отлична от цветности тестового белого, то вместо $n = Y_b/Y_w$ используется $n = Y_{bc}/Y_{wc}$.

Шаг 1
Расчет величины колбочковых псевдооткликов (RGB) по исследуемому образцу:

$$z = 1 - x - y$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = M_{BFD} \begin{pmatrix} x/y \\ y/y \\ z/y \end{pmatrix}, \text{ где } M_{BFD} = \begin{pmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{pmatrix}$$

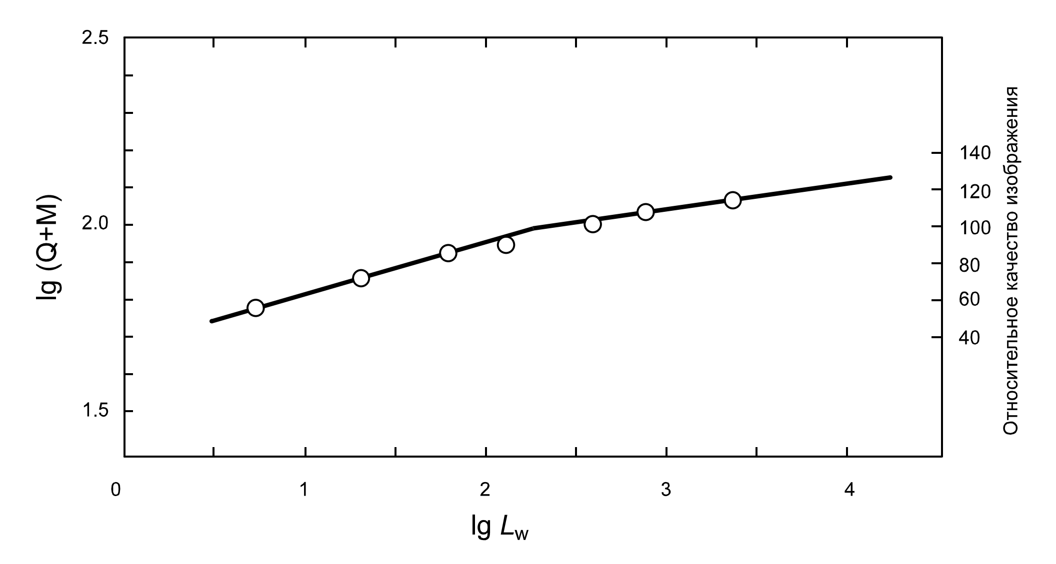


Рис. 35.15 *Кривая*: типичные средние значения десятичного логарифма суммы показателей субъективной яркости элементов проекционного изображения и показателей полноты их цвета при галогенных лампах накаливания и темном просмотровом окружении. *Кружки*: относительные величины качества изображений при разных фотометрических яркостях экрана (данные Бартлесона). По оси абсцисс отложены логарифмированные значения фотометрической яркости тестового белого при оптической плотности вуали слайда 0.3.

Аналогично:
— из x_w, y_w и Y_w вычисляются псевдоотклики по тестовому белому (R_w, G_w, B_w);
— из x_b, y_b и Y_b вычисляются псевдоотклики по фону (R_b, G_b, B_b);
— из x_{wr}, y_{wr} и Y_{wr} вычисляются псевдоотклики по эталонному белому (R_{wr}, G_{wr}, B_{wr}).

Шаг 2

Вычисление степени хроматической адаптации:

$$D = 1 + F - F/[1 + 2(L_A^{1/4}) + (L_A^2/300)]$$

Если хроматическая адаптация полная (полное когнитивное обесцвечивание осветителя), то $D = 1.0$; если адаптации вообще нет (первый момент после смены условий просмотра), то $D = 0$; если адаптация неполна, то есть осветитель обесцвечен лишь частично, то $D = 1/2\{1 + F - F/[1 + 2(L_A^{1/4}) + (L_A^2/300)]\}$.

Шаг 3

Расчет псевдооткликов ($R_cG_cB_c$) на согласованный стимул по эталонным условиям из псевдооткликов (RGB) на тестовый стимул:

$$R_c = [D(R_{wr}/R_w) + 1 - D]R$$

$$G_c = [D(G_{wr}/G_w) + 1 - D]G$$

$$B_c = [D(B_{wr}/B_w^p) + 1 - D]|B|^p \text{ при } B \geq 0$$

$$B_c = -[D(B_{wr}/B_w^p) + 1 - D]|B|^p \text{ при } B < 0, \text{ где } p = (B_w/B_{wr})^{0.0834}$$

Аналогично:

— из R_w, G_w и B_w вычисляются согласованные псевдоотклики по эталонному белому (R_{wc}, G_{wc}, B_{wc});

— из R_b, G_b и B_b вычисляются согласованные псевдоотклики по фону в эталонных условиях (R_{bc}, G_{bc}, B_{bc}).

Шаг 4

Вычисление $F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1-k^4)^2(5L_A)^{1/3}$, где $k = 1/(5L_A + 1)$.

Шаг 5

Вычисление подлинных колбочковых откликов:

$$\begin{pmatrix}\rho\\ \gamma\\ \beta\end{pmatrix} = M_H M_{BFD}^{-1}\begin{pmatrix}R_c Y\\ G_c Y\\ B_c Y\end{pmatrix} \text{ и } \begin{pmatrix}\rho_w\\ \gamma_w\\ \beta_w\end{pmatrix} = M_H M_{BFD}^{-1}\begin{pmatrix}R_{wc} Y_w\\ G_{wc} Y_w\\ B_{wc} Y_w\end{pmatrix},$$

где:

$$M_{BFD}^{-1} = \begin{pmatrix}0.98699 & -0.14705 & 0.15996\\ 0.43231 & 0.51836 & 0.04926\\ -0.00853 & 0.04004 & 0.96849\end{pmatrix} \text{ и } M_H = \begin{pmatrix}0.38971 & 0.68898 & -0.07868\\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641\\ 0.00 & -0.0 & 1.00\end{pmatrix}$$

Шаг 6

Вычисление согласованных фотометрических яркостей фона и эталонного белого стимула:

$$Y_{bc} = (0.43231R_{bc} + 0.51836G_{bc} + 0.04929B_{bc})Y_b,$$
$$Y_{wc} = (0.43231R_{wc} + 0.51836G_{wc} + 0.04929B_{wc})Y_w$$

а также вычисление $n = Y_b/Y_w$ и $N_{BB} = N_{CB} = 0.725(1/n)^{0.2}$ (если $x_b = x_w$ и $y_b = y_w$, то $R_b = R_w$ и, следовательно, $R_{bc} = R_{wc}$; аналогично по G и B, следовательно $Y_{bc}/Y_{wc} = Y_b/Y_w$).

Шаг 7

Вычисление постадаптационных подлинных колбочковых откликов ($\rho_a\gamma_a\beta_a$):

$$\rho_a = \frac{40(F_L\rho/100)^{0.73}}{\left[(F_L\rho/100)^{0.73} + 2\right]} + 1$$

$$\rho_{aw} = \frac{40(F_L\rho_w/100)^{0.73}}{\left[(F_L\rho_w/100)^{0.73} + 2\right]} + 1$$

$$\gamma_a = \frac{40(F_L\gamma/100)^{0.73}}{\left[(F_L\gamma/100)^{0.73} + 2\right]} + 1$$

$$\gamma_{aw} = \frac{40(F_L\gamma_w/100)^{0.73}}{\left[(F_L\gamma_w/100)^{0.73}+2\right]}+1$$

$$\beta_a = \frac{40(F_L\beta/100)^{0.73}}{\left[(F_L\beta/100)^{0.73}+2\right]}+1$$

$$\beta_{aw} = \frac{40(F_L\beta_w/100)^{0.73}}{\left[(F_L\beta_w/100)^{0.73}+2\right]}+1,$$

если $\rho < 0$, то используется выражение:

$$\rho_a = \frac{-40(-F_L\rho/100)^{0.73}}{\left[(-F_L\rho/100)^{0.73}+2\right]}+1,$$

и аналогично по уравнениям для ρ_{aw}, γ_{aw} и β_{aw}.

Шаг 8
Вычисление оппонентных откликов и угла цветового тона:

Оппонентные отклики по красно-зеленой оси	$a=\rho_a-12\gamma_a/11+\beta_a/11$
Оппонентные отклики по желто-зеленой оси	$b=(1/9)(\rho_a+\gamma_a-2\beta_a)$
Угол цветового тона	$h=\arctan(b/a)$

Шаг 9
Применение следующих значений однозначных цветовых тонов:

	Красный	Желтый	Зеленый	Синий
h	20.14	90.00	164.25	237.53
e	0.8	0.7	1.0	1.2

Вычисление:

$$e=e_1+(e_2-e_1)(h-h_1)/(h_2-h_1),$$

где e_1 и h_1 — это соответственно e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее меньшее значение h, а e_2 и h_2 — e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее большее значение h.

Вычисление квадратуры цветового тона:

$$H=H_1+\frac{100(h-h_1)/e_1}{(h-h_1)/e_1+(h_2-h)/e_2},$$

где H_1 — это 0, 100, 200, либо 300, согласно однозначным красному, желтому, зеленому и синему соответственно, а h —величина однозначного цветового тона, имеющего ближайшее меньшее значение к цветовому тону исследуемого стимула.

Вычисление состава цветового тона (H_C).

Шаг 10

Вычисление ахроматических откликов:

$$A = \left[2\rho_a + \gamma_a + (1/20)\beta_a - 2.05\right] N_{bb}$$

$$A_w = \left[2\rho_{aw} + \gamma_{aw} + (1/20)\beta_{aw} - 2.05\right] N_{bb}$$

Шаг 11

Вычисление предиктора светлоты:

$$J = 100(A/A_W)^{cz},$$

где $z = 1 + F_{LL} n^{1/2}$.

Шаг 12

Вычисление предиктора субъективной яркости:

$$Q = (1.24/c)(J/100)^{0.67}(A_W + 3)^{0.9}$$

Шаг 13

Вычисление предикторов чистоты цвета, насыщенности и полноты цвета:

$$s = \frac{50(a^2 + b^2)^{1/2} 100e(10/13) N_c N_{cb}}{\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a}$$

$$C = 2.44 s^{0.69} (J/100)^{0.67n} (1.64 - 0.29^n)$$

$$M = C F_L^{0.15}$$

35.23 ИНВЕРСИЯ CIECAM97S

Входные данные: Q или J, M или C, H или h. А также Q_w, A_w и Y_{bc}/Y_{wc}, полученные при прямом использовании модели по тестовому белому и фону в тестовых условиях (если $x_b = x_w$ и $y_b = y_w$, то $Y_{bc}/Y_{wc} = Y_b/Y_w$).

Параметры окружения: F, c, F_{LL}, N_c.

Параметры уровня фотометрической яркости адаптирующего поля и параметры степени адаптации: L_A, D.

Однозначные цветовые тона:

	Красный	Желтый	Зеленый	Синий
h	20.14	90.00	164.25	237.53
e	0.8	0.7	1.0	1.2

Обратный шаг 1

Получение J из Q:

$$J = 100(Qc/1.24)^{1/0.67} / (A_w + 3)^{0.9/0.67}$$

Обратный шаг 2

Получение A из J:

$$A = (J/100)^{1/cz} A_w,$$

где $z = 1 + F_{LL}(Y_b/Y_w)^{1/2}$.

Обратный шаг 3

Использование H, позиционирование h_1, h_2, e_1, e_2, где e_1 и h_1 — это соответственно e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее меньшее значение h, а e_2 и h_2 — e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее большее значение h.

Обратный шаг 4

Вычисление h:

$$h = \frac{(H - H_1)(h_1/e_1 - h_2/e_2) - 100\, h_1/e_1}{(H - H_1)(1/e_1 - 1/e_2) - 100/e_1},$$

где H_1 — это 0, 100, 200 или 300 (согласно однозначным красному, желтому, зеленому или синему цветовым тонам) в зависимости от того, чему равно ближайшее меньшее значение h.

Обратный шаг 5

Вычисление:

$$e = e_1 + (e_2 - e_1)\frac{(h - h_1)}{(h_2 - h_1)}$$

где e_1 и h_1 — это соответственно e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее меньшее значение h, а e_2 и h_2 — e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее большее значение h.

Обратный шаг 6

Вычисление C:

$$C = M/F_L^{0.15}$$

Обратный шаг 7

Вычисление s:

$$s = \frac{C^{1/0.69}}{[2.44(J/100)^{0.67n}(1.64 - 0.29^n)]^{1/0.69}},$$

где $n = Y_{bc}/Y_{wc}$.

Обратный шаг 8

Вычисление a и b:

$$a = \frac{s(A/N_{bb} + 2.05)}{\sqrt{[1+(\tan h)^2]}[50000 e N_c N_{cb}/13] + s[(11/23)+(108/23)(\tan h)]};$$

в данном уравнении при расчете A вместо коэффициента 2.05 используется 3.05; при вычислении $\sqrt{[1+(\tan h)^2]}$ результат берется положительным, если $0 \le h < 90$, отрицательным, если $90 \le h < 180$ или если $180 \le h < 270$, и положительным, если $270 \le h < 360$.

$$b = a(\tan h)$$

Обратный шаг 9

Вычисление:

$$\rho_a = (20/61)(A/N_{bb} + 2.05) + (41/61)(11/23)a + (288/61)(1/23)b$$
$$\gamma_a = (20/61)(A/N_{bb} + 2.05) - (81/61)(11/23)a - (261/61)(1/23)b$$
$$\beta_a = (20/61)(A/N_{bb} + 2.05) - (20/61)(11/23)a - (20/61)(315/23)b$$

Если при вычислении A использовался коэффициент 3.05, то он же должен применяться и в данном уравнении.

Обратный шаг 10

Вычисление:

$$F_L \rho = 100[(2\rho_a - 2)/(41 - \rho_a)]^{1/0.73}$$
$$F_L \gamma = 100[(2\gamma_a - 2)/(41 - \gamma_a)]^{1/0.73}$$
$$F_L \beta = 100[(2\beta_a - 2)/(41 - \beta_a)]^{1/0.73}$$

Если $\rho_a - 1 < 0$, то используется выражение:

$$F_L \rho = -100[(2 - 2\rho_a)/(39 + \rho_a)]^{1/0.73}$$

и аналогично по γ и β. Разделив каждое из трех выражений на F_L, получим величины ρ, γ и β.

Обратный шаг 11

Вычисление:

$$\begin{pmatrix} R_c Y \\ G_c Y \\ B_c Y \end{pmatrix} = M_{BFD} M_H^{-1} \begin{pmatrix} \rho \\ \gamma \\ \beta \end{pmatrix}, \text{ где } M_H^{-1} = \begin{pmatrix} 1.91019 & -1.11214 & 0.20195 \\ 0.37095 & 0.62905 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{pmatrix}$$

Обратный шаг 12

Вычисление:

$$Y_c = 0.43231 R_c Y + 0.51836 G_c Y + 0.04929 B_c Y$$

и, следовательно:

$$(Y/Y_c)R_c, (Y/Y_c)G_c, (Y/Y_c)B_c$$

Обратный шаг 13

Вычисление:

$$(Y/Y_c)R = (Y/Y_c)R_c / [D(R_{wr}/R_w) + 1 - D]$$
$$(Y/Y_c)R = (Y/Y_c)G_c / [D(G_{wr}/G_w) + 1 - D]$$
$$(Y/Y_c)^{1/p} B = [|(Y/Y_c)B_c|]^{1/p} / [D(B_{wr}/B_w^p) + 1 - D]^{1/p}$$

Если $(Y/Y_c)B_c < 0$, то $(Y/Y_c)^{1/p} B$ должно быть меньше 0.

Обратный шаг 14

Вычисление:

$$Y' = 0.43231 YR + 0.51836 YG + 0.04929 (Y/Y_c)^{1/p} BY_c$$
$$(Y/Y_c)^{(1/p-1)}$$

Обратный шаг 15

Вычисление:

$$\begin{pmatrix} X''/Y_c \\ Y''/Y_c \\ Z''/Y_c \end{pmatrix} = M_{BFD}^{-1} \begin{pmatrix} (Y/Y_c)R \\ (Y/Y_c)G \\ (Y/Y_c)^{1/p} B / (Y/Y_c)^{(1/p-1)} \end{pmatrix}$$

Обратный шаг 16

Умножение X''/Y_c, Y''/Y_c и Z''/Y_c на Y_c и получение $X''Y''Z''$, плотно аппроксимирующих XYZ.

Примечание: Величина Y' несколько отлична от Y, поскольку вместо YB используется $(Y/Y_c)^{1/p} BY_c$, однако умножение на 0.04929 позволяет свести отличия к минимуму. Показатель $(Y/Y_c)^{1/p} B/(Y'/Y_c)^{(1/p-1)} = (Y/Y_c)B(Y/Y')^{(1/p-1)}$, но поскольку Y и Y' очень близки друг к другу, а p редко когда отличен от 1.0 (по А-осветителю он равен 0.914), то $(Y/Y_c)^{1/p} B/(Y'/Y_c)^{(1/p-1)} \approx (Y/Y_c)B$, что необходимо для получения корректных величин X/Y_c, Y/Y_c и Z/Y_c.

35.24 ПРИМЕР РАБОТЫ CIECAM97S

Работу CIECAM97s мы продемонстрируем на примере образца, освещенного Стандартным А-осветителем, при четырех уровнях фотометрической яркости адаптирующего стимула (L_A).

Входные данные:

Образец в тестовых условиях	$x = 0.3618$	$y = 0.4483$	$Y = 23.93$
Белый в тестовых условиях (тестовый белый)	$x_w = 0.4476$	$y_w = 0.4074$	$Y_w = 90.0$
Фон в тестовых условиях	$x_b = 0.4476$	$y_b = 0.4074$	$Y_b = 18.0$
Белый в эталонных условиях (эталонный белый)	$x_{wr} = 1/3$	$y_{wr} = 1/3$	$Y_{wr} = 100$
Фотометрическая яркость адаптирующего поля в тестовых условиях (кд/м^2)	L_A: 2000	200	20 2
Окружение: среднее (малый образец)	$F_L = 1.0; c = 0.69; F_{LL} = 1.0; N_c = 1.0$		

Коэффициент степени адаптации (D) задавался уровнем L_A.
При вычислении ахроматического отклика (A) использовался коэффициент 2.05.

Прогноз по тестовому белому:

L_A	2000	200	20	2
Угол цветового тона (h)	41.8	57.4	58.8	59.5
Квадратура цветового тона (H)	28.3	50.0	52.0	53.0
Состав цветового тона (H_C)	28Y72R	50Y50R	52Y48R	53Y47R
Светлота (J)	100.0	100.0	100.0	100.0
Субъективная яркость (Q)	70.1	52.7	37.9	26.8
Чистота цвета (s)	0.0	0.5	12.6	25.9
Насыщенность (C)	0.1	1.3	12.1	19.8
Полнота цвета (M)	0.1	1.3	10.8	15.7

Прогноз по образцу:

L_A	2000	200	20	2
Угол цветового тона (h)	190.2	190.0	183.5	175.7
Квадратура цветового тона (H)	239.7	239.4	229.9	218.2
Состав цветового тона (H_C)	40B60G	39B61G	30B70G	18B82G
Светлота (J)	53.0	48.2	45.2	44.2
Субъективная яркость (Q)	45.8	32.3	22.3	15.5
Чистота цвета (s)	120.0	125.9	114.0	96.5
Насыщенность (C)	52.4	53.5	49.5	44.0
Полнота цвета (M)	58.8	53.5	44.1	34.9

Из приведенных выше данных видно, что:

— тестовый белый выглядит красновато-желтоватым (поскольку применен Стандартный А-осветитель), и его полнота цвета растет по мере падения уровня освещенности, поскольку полнота адаптации при этом снижается;

— образец — сине-зеленый; чистота его цвета (s), насыщенность (C) и светлота (J) остаются примерно постоянными при разных уровнях освещения, что указывает на примерное постоянство *визуальной* освещенности;

— как и ожидалось, субъективная яркость (Q) тестового белого и образца, а также полнота цвета образца (M) падают по мере снижения уровня освещения, но светлота (J) у тестового белого остается неизменной (100) и более или менее постоянной у образца.

На рис. 35.16 даны графики динамики субъективной яркости, светлоты и полноты цвета.

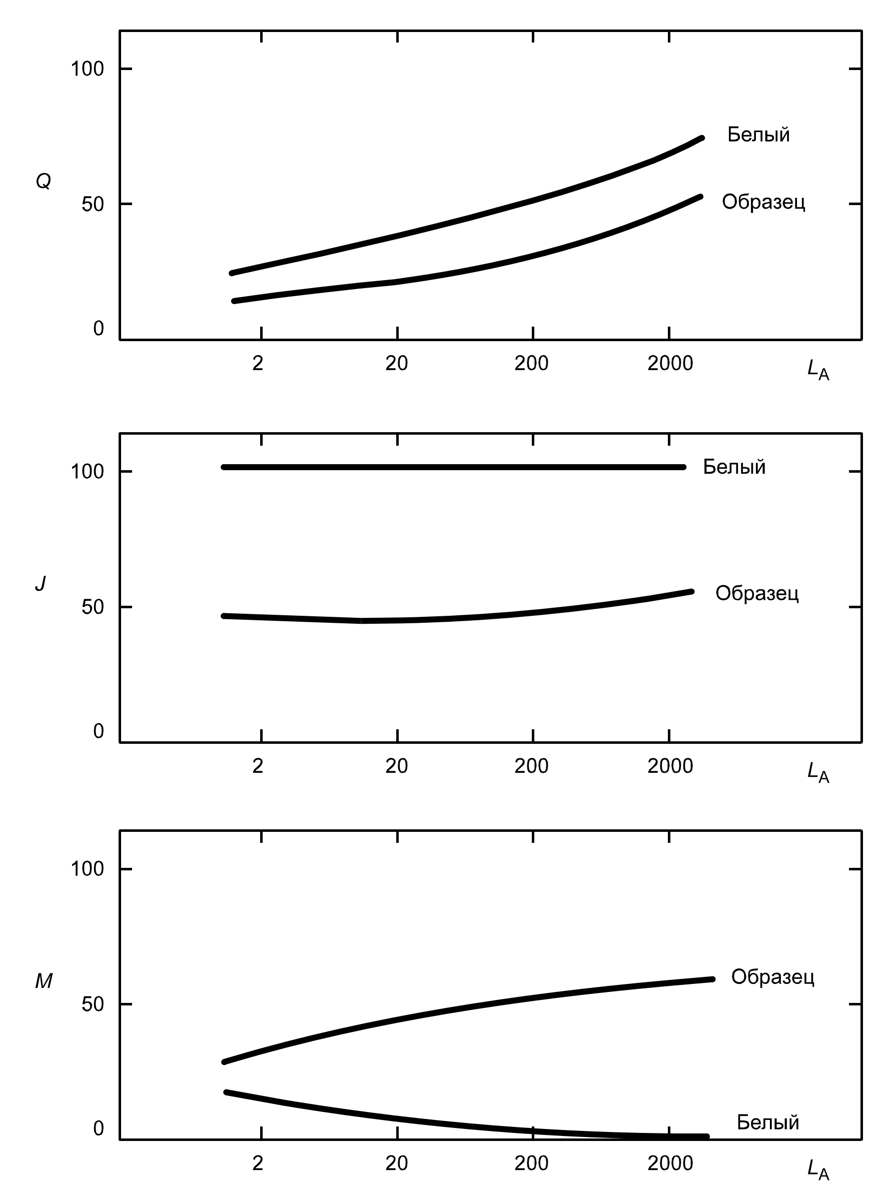


Рис. 35.16 Предикторысубъективной яркости, светлоты и полноты цвета по рабочим образцам.

35.25 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИНВЕРТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ

В инвертированном виде модели цветового восприятия находят применение в разных ситуациях, к примеру: они позволяют учесть отличия в условиях просмотра (и прочих параметрах воспроизведения) изображений, визуализированных разными устройствами.

На рис. 35.17 дана схема, демонстрирующая этапы цветорепродукционной цепи, на которых подключаются модели цветового восприятия.

- **На первом этапе** происходит конверсия сигналов устройства ввода (например, RGB-сигналов сканера) в аппаратно-независимые колориметрические величины (например, трехстимульные значения — XYZ). Выполняется с помощью данных колориметрической характеризации этого устройства.

- **На втором этапе** с помощью той или иной модели цветового восприятия выполняется конверсия колориметрических величин в величины перцепционные (в частности: корреляты цветового тона, светлоты и насыщенности либо цветового тона, субъективной яркости и полноты цвета). В расчетах учитываются яркостная адаптация наблюдателя в условиях просмотра оригинала, хроматическая адаптация, эффекты фона и окружения, а также ряд когнитивных факторов.

- **На третьем этапе** выполняется учет отличий между цветовыми охватами оригинала и устройства вывода (включая тоновую компрессию), отличия между цветовыми установками, а также эффекты пространственного масштабирования изображения. Стоит отметить, что если несоответствия охватов нет и также нет различия в цветовых установках, то по восприятию копия будет идентична оригиналу.

- **На четвертом этапе** с целью получения согласованных колориметрических величин (например, трехстимульных значений $X'Y'Z'$) рассчитанные и обработанные ранее перцепционные корреляты используются в качестве входных данных инвертированной модели. При этом учитываются яркостная адаптация наблюдателя в условиях просмотра репродукции, его хроматическая адаптация, эффекты фона и окружения, а также ряд когнитивных факторов.

- **На пятом этапе** при поддержке данных колориметрической характеризации устройства вывода рассчитываются аппаратные сигналы этого устройства (к примеру, площади заполнения поверхности растровыми элементами триады — CMYK).

Узлы, которые предлагает к использованию Международный консорциум по цвету (ICC), отмечены на рис. 35.17 полужирным.

Дальнейшее развитие ICC-системы предполагает объединение входного PCS, модуля цветопередачи (RIM — Rendering Intent Module) и выходного PCS в единый Модуль управления цветовоспроизведением (CMM — Color Management Module), в котором гамут-мэппинг и прочие процедуры цветокоррекции выполняются в цветовом перцепционном пространстве (Kohler, 2000). Чтобы эта идея была осуществима, профайлы устройств ввода и вывода должны нести в себе дополнительные данные, определяющие границы их цветового охвата (например, тэги, относящиеся к категории GBD — gamut boundary description), а также данные об условиях просмотра.

Некоторые CMS позволяют сохранять информацию о стимулах, внегамутных ти-

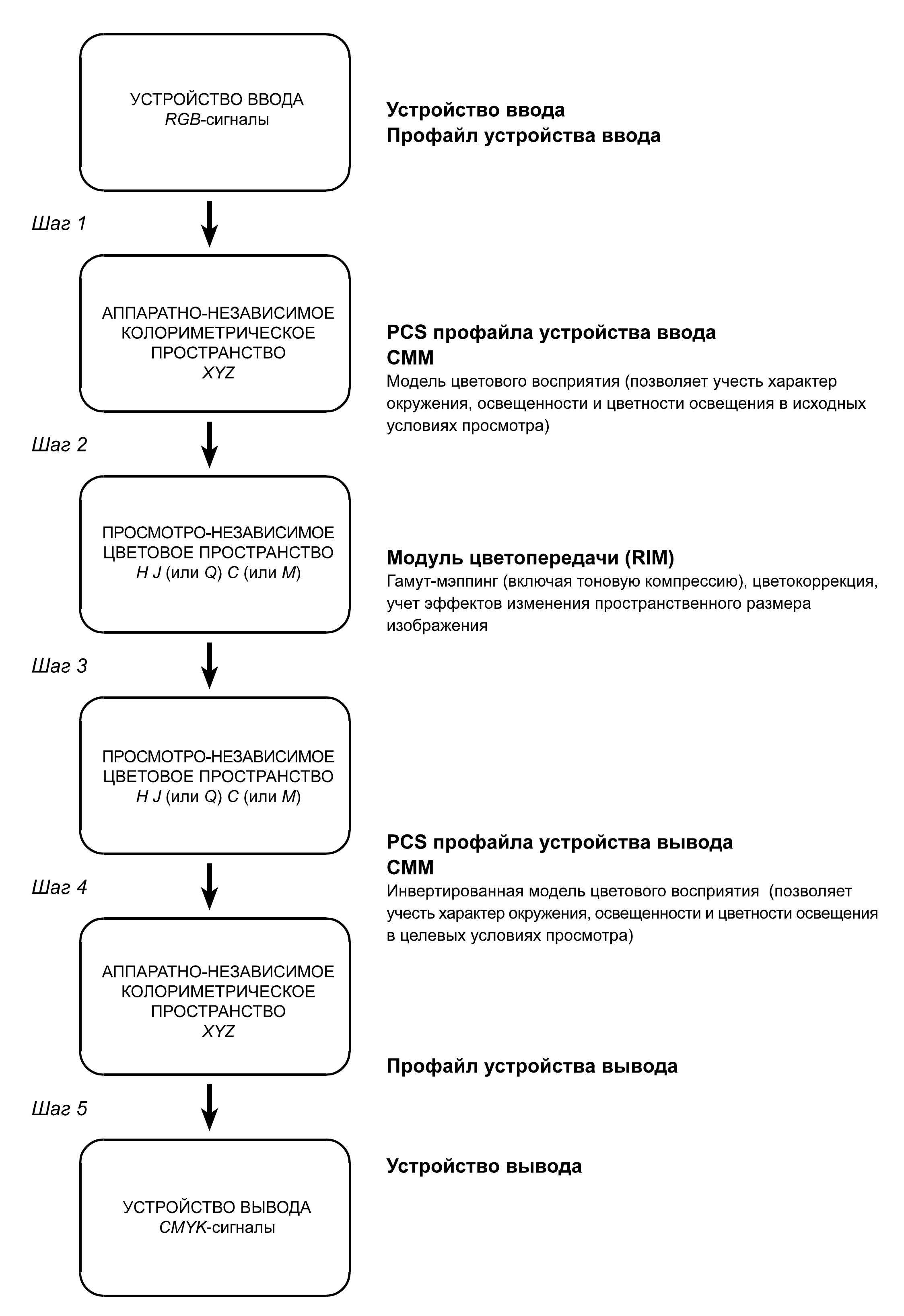


Рис. 35.17 Схема, демонстрирующая применение моделей цветового восприятия в работе цифровой цветорепродукционной цепи. Полужирным выделены элементы, реализуемые ICC.

пичному RGB, за счет применения отрицательных значений (Spaulding, Woolfe и Giorgianni, 2000). Однако поскольку на практике возникают сложности с управлением отрицательными величинами, системы кодирования колориметрической информации используют гипотетические кардинальные стимулы, охват которых включает в себя колориметрию всех возможных предметных стимулов.[1]

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Arend, L. & Reeves, A. J Opt. Soc. Amer. A. 3, 1743 (1986).

Attridge, G.G., Pointer, M.R. and Jacobson, R.E. J. Phot. Sci. 44, 187 (1997).

Bartleson, C.J. Die Farbe 28, 132 (1980).

Bartleson, C.J. Phot. Sci. Eng. 9, 174 (1965).

Baylor, D.A. Investig. Ophthalmol. 28, 34 (1987).

Boynton, R.M. and Whitten, D.N. Science 170, 1423 (1970).

Braun, K.M., & Fairchild, M.D. IS&T and SID's 4th Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, page 214. IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (1996).

Breneman, E.J. J. Opt. Soc. Amer. A. 4, 1115 (1987).

Estйvez, O. On the fundamental data-base of normal and dichromatic colour vision. Ph.D. thesis, University of Amsterdam (1979).

Fairchild, M.D., IS&T and SID's 2nd Color Imaging Conference : Color Science, Systems, and Applications, page 9, IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (1994).

Fairchild, M.D., and Berns, R.S., Color Res. Appl., 18, 178 (1993).

Fairchild, M.D. Color Res. Appl. 21, 338 (1996).

Fairchild, M.D. Color Appearance Models, Addison-Wesley Longman, Reading, Massachusetts, U.S.A. (1997).

Fairchild, M.D., and Berns, R.S. Color Res. Appl. 18, 178 (1993).

Helson, H., Judd, D.B. and Warren, M.H. Illum. Eng. 47, 221 (1952).

Hunt, R.W.G. J. Opt. Soc. Amer., 40, 362 (1950).

Hunt, R.W.G. J. Opt. Soc. Amer., 42, 190 (1952).

Hunt, R.W.G. J. Opt. Soc. Amer., 43, 479 (1953).

Hunt, R.W.G. Color Res. Appl. 7, 95 (1982).

Hunt, R.W.G. Color Res. Appl. 10, 12 (1985).

Hunt, R.W.G. Color Res. Appl. 12, 297 (1987).

Hunt, R.W.G. Color Res. Appl. 16, 146 (1991).

Hunt, R.W.G. Color Res. Appl. 19, 23 (1994).

Hunt, R.W.G. and Luo, M.R. Color Res. Appl. 19, 27 (1994).

Hunt, R.W.G. and Pointer, M.R. Color Res. Appl. 10, 165 (1985).

Hurvich, L.M. and Jameson, D. J. Opt. Soc. Amer. 41, 521 (1951).

Jameson, D. & Hurvich, L.M. Vision Res. 4, 135 (1964).

Kohler, T. IS&T and SID's 8th Color Imaging Conference, Colour Science and Engineering Systems, Technologies, Applications, page 61. IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (2000).

Kuehni, R.G., Color Res. Appl., 29, 158 (2004).

Kuo, W.-G., Luo, M.R. and Bez, H.E. Color Res. Appl. 20, 313 (1995).

Lam, K.M. Ph.D. Thesis. Metamerism and colour constancy. University of Bradford (1985).

Li, C.J., Luo, M.R. and Hunt, R.W.G. Color Res. Appl., 25, 260 (2000).

Luo, M.R., Clarke, A.A., Rhodes, P.A., Schappo, A., Scrivener, S.A.R. and Tait, C.J. Color Res. Appl. 16, 166 and 181 (1991).

[1] Напомним, что предметными называют стимулы, полученные отражением света от различных поверхностей. — *Прим. пер.*

Luo, M.R., Gao, X.W., Rhodes, P.A., Xin, H.J., Clarke, A.A., and Scrivener, S.A.R. Color Res. Appl., 18, 98 and 191 (1993).
Luo, M.R. and Hunt, R.W.G. Color Res. Appl. 23, 138 and 147 (1998).
Luo, M.R., Lo, M.-C. and Kuo, W.-G. Color Res. Appl. 21, 412 (1996).
MacDonald, L.W., Luo, M.R. and Scrivener, S.A.R. J. Phot. Sci. 38, 177 (1990).
McCann, J.J. and Houston, K.L. In Colour Vision, eds J.D. Mollon and L.T. Sharpe, pp. 535–544, Academic Press, London (1983).
McCann, J.J., McKee, S.P. and Taylor, T.H. Vision Res. 16, 445 (1976).
Mori, L., Sobagaki, H., Komatsubara, H. and Ikeda, K. Proceedings of the CIE 22nd Session, page 55 (1991).
Nayatani, Y. Color Res. Appl. 22, 156 and 259 (1997).
Nayatani, Y., Hashimoto, K., Takahama, K. and Sobagaki, H. Color Res. Appl. 12, 121 and 231 (1987).
Nayatani, Y., Sobagaki, H., Hashimoto, K. and Yano, T. Color Res. Appl. 22, 240 (1997).
Nayatani, Y., Takahama, K. and Sobagaki, H. Color Res. Appl. 11, 62 (1986).
Nayatani, Y., Takahama, K., Sobagaki, H. and Hashimoto, K. Color Res. Appl. 15, 210 (1990).
Pointer, M.R. J. Phot. Sci. 34, 81 (1986).
Seim, T. and Valberg, A. Color Res. Appl. 11, 11 (1986).
Smith, V.C. and Pokorny, J. Vision Res., 12, 2059 (1972).
Spaulding, K.E., Woolfe, G.J., and Giorgianni, E.J. IS&T and SID's 8th Color Imaging Conference, Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications, page 288. IS&T, Springfield, Va., U.S.A. (2000).
Stevens, S.S. Science 133, 80 (1961).
Valeton, J.M. and Van Norren, D. Vision Res. 23, 1539 (1983).
Walraven, P.L. and Bouman, M.A. Vision Res. 6, 567 (1966).

36 ПРОЧИЕ МОДЕЛИ ЦВЕТОВОГО ВОСПРИЯТИЯ

36.1 ВВЕДЕНИЕ

Дабы уйти от математических нагромождений, из полноценной модели CAM97c[1] разработчики исключили некоторые (не столь значимые) узлы, что превратило ее в модель CIECAM97s[2]. CAM97c включала в себя модули, позволявшие учитывать эффект отбеливания колбочковых фотопигментов (т.н. *колбочковое ослепление*), эффект Хельсона — Джадда (тенденция особо ярких предметных стимулов приобретать цветовой тон осветителя и особо темных — дополнительный цветовой тон [Helson, 1938]), вклад палочек в ахроматический отклик зрительной системы, низкояркостную тританопию (легкое снижение желто-синей чувствительности в сравнении с красно-зеленой при низких уровнях освещенности), а также эффект Гельмгольца — Кольрауша (рост субъективной яркости стимула по мере роста его колориметрической чистоты при постоянной фотометрической яркости [McAdam, 1950]).

Особо отметим, что модели CIECAM97s и CAM97c ориентированы на работу с т.н. *неизолированными* стимулами, т.е. теми, которые воздействуют на зрительную систему наблюдателя в связке с другими стимулами (что свойственно изображениям реальных сцен).

Также в текущей главе мы опишем модель, прогнозирующую результаты восприятия *изолированных* стимулов. К категории изолированных относят стимулы, предъявляемые наблюдателю изолированно от других, к примеру такие, как сигнальные огни на темном фоне или источники света (фотометрическая яркость которых много выше, чем у их окружения). Особенностью восприятия изолированных стимулов является то, что вызываемые ими ощущения не имеют таких чувственных атрибутов, как светлота (lightness) и насыщенность (chroma), но только субъективную яркость (brightness), полноту цвета (colorfulness) и цветовой тон (hue).

36.2 ШАГИ РАБОТЫ ПОЛНОЙ ВЕРСИИ CAM97 (CAM97C)

Шаги работы CAM97c те же, что и у CIECAM97s, за исключением следующих:

Шаг 7

Вычисление **постадаптационных колбочковых откликов:**

$$\rho_a = B_R \frac{40(F_L \rho/100)^{0.73}}{\left[(F_L \rho/100)^{0.73} + 2\right] + \rho_D} + 1$$

---

1 Литера «c» означает «comprehensive» — полная. — *Прим. пер.*

2 Литера «s» означает «simple» — упрощенная. — *Прим. пер.*

$$\gamma_a = B_G \frac{40(F_L\gamma/100)^{0.73}}{\left[(F_L\gamma/100)^{0.73}+2\right]+\gamma_D}+1$$

$$\beta_a = B_B \frac{40(F_L\beta/100)^{0.73}}{\left[(F_L\beta/100)^{0.73}+2\right]+\beta_D}+1,$$

где: B_R, B_G и B_B — коэффициенты колбочкового ослепления, рассчитываемые по уравнениям:

$$B_\rho = 10^7/[10^7+5L_A(\rho_W/100)]$$
$$B_\gamma = 10^7/[10^7+5L_A(\gamma_W/100)]$$
$$B_\beta = 10^7/[10^7+5L_A(\beta_W/100)]$$

Когда возникает колбочковое ослепление, данные коэффициенты равны единице.

Вычисление **коэффициентов учета эффекта Хельсона — Джадда** (ρ_D, γ_D, β_D):

$$\rho_D = k_D(\rho/\rho_w - Y_{bc}/Y_{wc})(\rho/\rho_w - 1/3)$$
$$\gamma_D = k_D(\gamma/\gamma_w - Y_{bc}/Y_{wc})(\gamma/\gamma_w - 1/3)\ ,$$
$$\beta_D = k_D(\beta/\beta_w - Y_{bc}/Y_{wc})(\beta/\beta_w - 1/3)$$

где k_D — константа, значение которой «управляет» мерой выраженности данного эффекта. Когда эффект Хельсона — Джадда отсутствует или же когда осветитель полностью обесцвечен ментально, то $\rho_D = \gamma_D = \beta_D$.

Шаг 10

Учет **скотопического ахроматического компонента** (т.е. вклада палочек в результат зрительного восприятия):

$$A_S = 3.05B_S[f_n(F_{LS}S/S_W)]+0.3,$$

где $f_n()$ — общая гиперболическая функция, применяемая с целью моделирования нелинейного поведения различных визуальных откликов:

$$f_n[I] = 40[I^{0.73}/(I^{0.73}+2)].$$

Расчет **коэффициента колбочкового ослепления** (B_S):

$$B_S = 0.5/\left\{1+0.3[(5L_{AS}/2.26)(S/S_W)]^{0.3}\right\}+0.5/\left\{1+5[5L_{AS}/2.26]\right\}.$$

Расчет **коэффициента адаптации по скотопической яркости** (F_{LS}):

$$F_{LS} = 3800j^2(5L_{AS}/2.26)+0.2(1-j^2)^4(5L_{AS}/2.26)^{1/6},$$

где $j = 0.00001/[(5L_{AS}/2.26) + 0.00001]$.

Если отношение скотопической фотометрической яркости образца к таковой у тестового белого (S/S_w) неизвестно, вместо него можно использовать соответствующее фотопическое значение (Y/Y_w). Если неизвестна скотопическая фотометрическая яркость адаптирующего поля (L_{AS}), ее можно приблизительно рассчитать по уравнению:

$$L_{AS}/2.26 = L_A \sqrt[3]{(T/4000 - 0.4)},$$

где T — это коррелированная цветовая температура освещения. Отметим, что вместо L_{AS} использовано $L_{AS}/2.26$, поскольку $L_{AS}/2.26 = L_A$ по равноэнергетическому стимулу (S_E).

Расчет **общего ахроматического отклика** (A):

$$A = [2\rho_a + \gamma_a + (1/20)\beta_a + A_S - 2.31]N_{bb}$$

где -2.31 вычислено как $-2.05 - 1 - 0.3 + \sqrt{1^2 + 0.3^2}$.

Ахроматический отклик по белому стимулу (A_w) вычисляется аналогично.

Шаг 13

Вычисление **низкояркостного тританопического коэффициента** (F_t):

$$F_t = L_A/(L_A + 0.1)$$
$$b_t = bF_t$$

и **чистоты цвета** (s):

$$s = \frac{50\sqrt{(a^2 + b_t^2)}100e(10/13)N_c N_{cb}}{\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a}$$

Шаг 14

Учет **эффекта Гельмгольца — Кольрауша:**

$$J_{HK} = J + (|100 - J|)(C/300)(\sin|((h - 90)/2)|)$$
$$Q_{HK} = (1.24/c)(J_{HK}/100)^{0.67}(A_w + 3)^{0.9}$$

36.3 ИНВЕРСИЯ CAM97C

Из-за присутствия в ахроматическом отклике палочкового компонента инверсия CAM97c весьма затруднительна.

Мы помним, что значение A_S зависимо от S/S_w, величина которого чаще всего неизвестна, из-за чего используется Y/Y_w. Однако при инверсии модели в этом случае требуется ряд дополнительных шагов. Возможны два варианта действий.

36.3.1 Первый вариант инверсии

Расчет величины $(S/S_w)_J$, аппроксимирующей S/S_w. При фотопических условиях и при коэффициентах яркости не ниже 3% может применяться следующее уравнение:

$$(S/S_w)_J = \frac{\{J - [\lg(5L_A)]^2/4\}^{1.8}}{\{J - [\lg(5L_A)]^2/4\}^{1.8}}.$$

Отношение $(S/S_w)_J$ можно использовать затем при вычислении величин X, Y и Z. Отметим, что, ежели в прямой модели вместо Y/Y_w применять $(S/S_w)_J$, величины H и s останутся неизменными, C и M изменятся минимально, а Q и J — незначительно. В большинстве ситуаций этими изменениями можно смело пренебречь. Однако, когда требуются точные цифры, вместо S/S_w можно использовать результирующее соотношение Y/Y_w: вычисления повторяют до тех пор, пока не будут получены стабильные величины Y/Y_w.

36.3.2 Второй вариант инверсии

Второй вариант требует того, чтобы отношение S/S_w изначально было равным Y/Y_w, а при выполнении расчетов применяются методы т.н. *последовательной численной аппроксимации*.

36.4 ИЗОЛИРОВАННЫЕ СТИМУЛЫ. МОДЕЛЬ CAM97U[1]

Существует не принятая Международной комиссией по освещению модель, прогнозирующая результаты цветового восприятия *изолированных* стимулов.

Напомним, что изолированными называются стимулы, предъявляемые наблюдателю отдельно от прочих стимулов. К изолированным стимулам можно отнести световые потоки от ярких источников света, а также стимулы, создаваемые равномерно окрашенными областями, рассматриваемыми на неосвещенных фонах, то есть фонах, фотометрическая яркость которых много меньше, чем таковая у стимулов исследуемых.

36.4.1 Адаптирующий стимул

Стоит сказать, что даже при совершенно черных фонах невозможно получить нулевое значение яркости адаптирующего поля (L_A), поскольку и сам образец, и рассеянный им в глазных средах свет создают адаптирующий стимул с фотометрической яркостью отличной от нулевой. Следовательно, если L — это фотометрическая яркость исследуемого стимула (образца), то фотометрическая яркость стимула адаптирующего может быть рассчитана по уравнению:

$$L_A = L^{2/3}/200$$

и если $L_S/2.26$ — это скотопическая фотометрическая яркость образца (деленная на 2.26), то скотопическая яркость адаптирующего поля (деленная на 2.26) будет равной:

$$L_{AS}/2.26 = (L_S/2.26)^{2/3}/200$$

---

1 Литера «u» означает «unrelated» — изолированный — *Прим. пер.*

Из приведенного выше уравнения следует, что эффективная фотометрическая яркость адаптирующего стимула составит 1/2000 фотометрической яркости стимула исследуемого, когда последняя равна 1000 кд/м²; 1/200 — когда последняя составляет 1 кд/м²; 1/20 — при 0.001 кд/м² и, наконец, равна фотометрической яркости образца при 0.000000125 кд/м².

Цветность адаптирующего поля по изолированным стимулам берется равной цветности равноэнергетического стимула S_E, поскольку последний, как мы помним, воспринимается полностью нейтральным при темновой адаптации зрения (Hurvich и Jameson, 1951). Отметим, что цветность адаптирующего поля не является функцией от цветности образца, поскольку фотометрическая яркость света, принятого за адаптирующий, меньше 1/100 яркости образца (по стимулам, яркости которых лежат в фотопическом диапазоне).

36.4.2 Сопрягающее поле

Иногда изолированные стимулы быстро сменяют предыдущие, к примеру: пилот при ночной посадке вначале смотрит на приборную доску кабины, а затем на огни взлетно-посадочной полосы. Чтобы прогнозировать результат восприятия в подобных ситуациях, ввели понятие *сопрягающего поля* (conditioning field).

⇨ *Сопрягающее поле* — это поле, стимул от которого предъявлялся наблюдателю непосредственно перед стимулом изолированным (т.е. исследуемым).

Цветность сопрягающего поля обозначают как x_C, y_C, его фотометрическую яркость — как L_C, а скотопическую яркость (деленную на 2.26) — как $L_{CS}/2.26$. Если сопрягающего поля нет, то значения x_C, y_C, L_C и $L_{CS}/2.26$ приравниваются к таковым у поля адаптирующего.

Когда $L_C > L_A$, то с целью снижения величины предиктора колбочкового отклика используется коэффициент $(L_A/L_C)^c$, а когда $L_{CS}/2.26 > L_{AS}/2.26$, то, чтобы снизить величину предиктора палочкового отклика, используется коэффициент $[(L_{AS}/2.26)/(L_{CS}/2.26)]^c$ — см. раздел 36.5.2 Шаг 6; а также Шаг 15, на котором $[(L_{AS}/2.26)/(L_{CS}/2.26)]^c$ упрощается до $(L_{AS}/L_{CS})^c$, где $c \approx 0.2$.

Если скотопическая фотометрическая яркость стимулов (L_S) неизвестна, а их цветности близки к цветности планковского черного тела, то в уравнении расчета $L_S/2.26$ из фотопической фотометрической яркости можно использовать величину коррелированной цветовой температуры T (подобно тому как она используется в формуле по неизолированным стимулам):

$$L_S/2.26 = \sqrt[3]{L(T/4000 - 0.4)}$$

По прочим стимулам скотопическая фотометрическая яркость (деленная на 2.26) должна рассчитываться из спектрального распределения энергии и с применением функции скотопической световой эффективности $V'(\lambda)$ (см. Приложение 7).

36.4.3 Учет колбочковой чувствительности

Нетрудно догадаться, что к изолированным стимулам неприменима концепция эталонного белого. Однако с целью частичного «управления» колбочковой чувствительностью (подобного тому, что применяется в случае стимулов неизолированных,

когда, напомним, величины ρ, γ и β делятся на 100) величины ρ, γ и β в данном случае делятся на коэффициент колбочковой чувствительности к изолированным стимулам (W):

$$W = \sqrt{(1/3)(\rho + \beta + \gamma)}$$

(см. раздел 36.5.2, Шаг 6). Сие позволяет учесть некоторое влияние интенсивности исследуемого стимула на чувствительность колбочковой системы, но нужно помнить, что частично оно определяется зрачковым рефлексом.

Аналогичным образом можно учесть изменение чувствительности палочковой системы, разделив величину скотопической фотометрической яркости (деленной на 2.26) на квадратный корень из того же выражения (см. раздел 36.5.2, Шаг 15), то есть:

$$\frac{L_S/2.26}{\sqrt{L_S/2.26}}.$$

Коэффициенты колбочкового ослепления (B_{ru}, B_{gu}, B_{bu}), а также $\rho_w/100$, $\gamma_w/100$ и $\beta_w/100$ заменяются на:

$$3\rho_C/(\rho_C + \gamma_C + \beta_C)$$
$$3\gamma_C/(\rho_C + \gamma_C + \beta_C),$$
$$3\beta_C/(\rho_C + \gamma_C + \beta_C)$$

где ρ_C, γ_C и β_C — величины колбочковых откликов по сопрягающему полю (см. раздел 36.5.2, Шаг 6).

В коэффициенте палочкового ослепления по изолированным стимулам (B_{Su}) отношение S/S_w заменено на:

$$\frac{L_S/2.26}{\sqrt{L_S/2.26}}$$

(см. раздел 36.5.2, Шаг 15).

36.4.4 Низкояркостная тританопия

Низкояркостный тританопический коэффициент по изолированным стимулам (F_{tu}) рассчитывается с использованием величины L, т.е. фотометрической яркости *образца*, но не адаптирующего поля (L_A):

$$F_{tu} = L/(L + 0.1)$$

36.4.5 Учет эффекта Бецольда — Брюкке

Отметим, что уровень фотометрической яркости стимула влияет на его цветовой тон, если стимул этот изолированный, и не влияет — если стимул неизолированный (Hunt, 1989). Данный феномен, известный как *эффект Бецольда — Брюкке*, учитыва-

ется с помощью коэффициента эксцентричности (e), который, в свою очередь, зависит от фотометрической яркости стимула (L).

По однозначным желтым и однозначным синим цветовым тонам коэффициент эксцентричности рассчитывается по уравнениям:

Желтый $e = 0.7[L/(L+10)] + 0.3[10/(L+10)]$
Синий $e = 1.2[L/(L+10)] + 0.2[10/(L+10)]$

36.4.6 Прогноз прочих показателей

Фотометрические яркости фона и окружения у изолированных стимулов обычно много меньше, чем у стимула исследуемого, следовательно, коэффициент хроматической индукции (N_c) полагают равным 0.5. Уравнения расчета коррелятов цветового тона (H и H_C), полноты цвета (M) и чистоты цвета (s) по изолированным стимулам даны в разделе 36.5.2, Шаги 9, 10 и 13.

Коррелят субъективной яркости (Q) изолированных стимулов рассчитывается по уравнению:

$$Q = \{[1.1][A + (M/100)]\}^{0.9}$$

На рис. 36.1 десятичный логарифм коррелята субъективной яркости стимула (lg$Q$) дан как функция от десятичного логарифма его фотометрической яркости (LgL) и сравнивается с экспериментальными результатами, полученными Бартлесоном (Bartleson, 1980). Мы видим, что совпадение данных очень высокое.

36.5 ШАГИ РАБОТЫ CAM97U

36.5.1 Входные данные модели

Модели CAM97u необходимы следующие входные данные:

Координаты цветностей, а также фотопические и скотопические фотометрические яркости

Исследуемого стимула (образца)	x	y	L	L_S
Адаптирующего поля	x_A	y_A	L_A	L_{AS}
Сопрягающего поля	x_C	y_C	L_C	L_{CS}

Фотопическая фотометрическая яркость адаптирующего поля (L_A) рассчитывается по уравнению:

$$L^{2/3}/200.$$

Скотопическая фотометрическая яркость адаптирующего поля, деленная на 2.26, (L_{AS}) рассчитывается по уравнению:

$$L_S/2.26 = \frac{(L_S/2.26)^{2/3}}{200}.$$

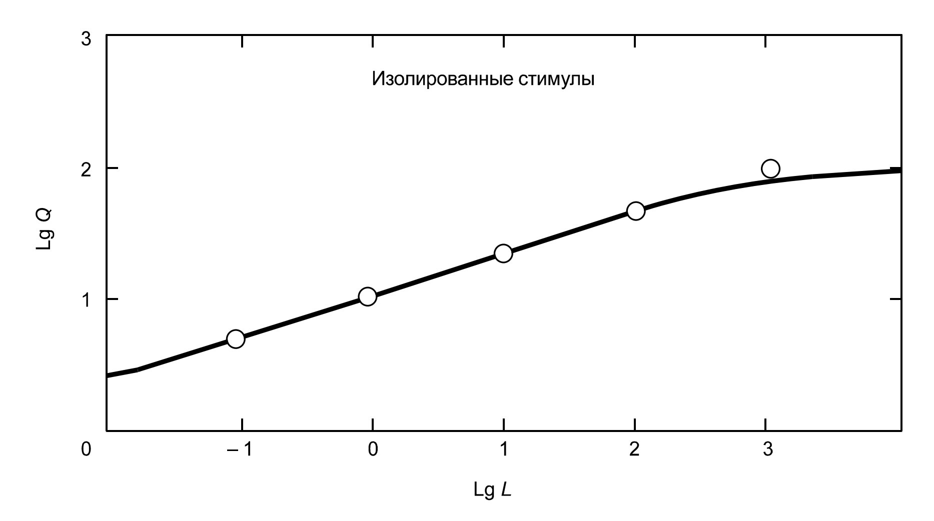


Рис. 36.1 Логарифм субъективной яркости (LgQ) изолированных стимулов как функция от логарифма их фотометрической яркости (или скотопической фотометрической, деленной на 2.26) (LgL). Скотопическая фотометрическая яркость (кд/м^2), деленная на 2.26, приравнена к фотопической фотометрической яркости (кд/м^2) равноэнергетического стимула (S_E). *Кружки*: экспериментальные данные Бартлесона. *Линия*: предикторы CAM97u.

Цветность адаптирующего поля принимается равной цветности равноэнергетического стимула S_E, то есть $x_A = 1/3$, $y_A = 1/3$. Напомним, что ранее мы ввели понятие сопрягающего поля — поля, которое воздействует на зрительную систему наблюдателя непосредственно перед исследуемым стимулом. Если сопрягающее поле отсутствует, значения x_C, y_C, L_C и L_{CS} берутся равными таковым у поля адаптирующего.

Когда **скотопическая фотометрическая яркость** стимула (L_S) неизвестна, она вычисляется из фотопической яркости (L) по уравнению:

$$L_S/2.26 = \sqrt[3]{L(T/4000 - 0.4)},$$

где T — это коррелированная цветовая температура интересующего стимула при условии, что его цветность близка к локусу планковских цветностей. По прочим стимулам скотопические яркости должны рассчитываться из спектрального распределения энергии этих стимулов с использованием функции скотопической световой эффективности $V'(\lambda)$ (см. Приложение 7).

Коэффициент хроматической индукции (N_c) по изолированным стимулам принимается равным 0.5.

36.5.2 Шаги работы модели

Шаг 1

Вычисление $\boldsymbol{X_L}$, $\boldsymbol{Y_L}$, $\boldsymbol{Z_L}$ **образца и сопрягающего поля:**

$$X_L = xL/y \qquad Y_L = L \qquad Z_L = (1 - x - y)L/y$$

Шаг 2

Вычисление величин **колбочковых откликов** ($\rho\gamma\beta$) *на исследуемый стимул* (образец) и **стимул от сопрягающего поля:**

$$\rho = 0.38971X_L + 0.68898Y_L - 0.07868Z_L$$
$$\gamma = -0.22981X_L + 1.18340Y_L + 0.04641Z_L$$
$$\beta = 1.00000Z_L$$

Шаг 3

Вычисление **коэффициента колбочковой чувствительности к изолированным стимулам (W):**

$$W = \sqrt{[(1/3)(\rho + \gamma + \beta)]}$$

Шаг 4

Вычисление **коэффициента адаптации по фотометрической яркости (F_L):**

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2\sqrt[3]{(5L_A)},$$

где $k = 1/(5L_A + 1)$.

Шаг 5

Вычисление **коэффициентов хроматической адаптации (F_ρ, F_γ, F_β):**

$$h_\rho = 3\rho_C/(\rho_C + \gamma_C + \beta_C)$$
$$h_\gamma = 3\gamma_C/(\rho_C + \gamma_C + \beta_C)$$
$$h_\beta = 3\beta_C/(\rho_C + \gamma_C + \beta_C)$$
$$F_\rho = (1 + \sqrt[3]{L_A} + h_\rho)/(1 + \sqrt[3]{L_A} + 1/h_\rho)$$
$$F_\gamma = (1 + \sqrt[3]{L_A} + h_\gamma)/(1 + \sqrt[3]{L_A} + 1/h_\gamma)$$
$$F_\beta = (1 + \sqrt[3]{L_A} + h_\beta)/(1 + \sqrt[3]{L_A} + 1/h_\beta)$$

Если сопрягающего поля нет, то $h_\rho = h_\gamma = h_\beta = 1$ и $F_\rho = F_\gamma = F_\beta = 1$.

Шаг 6

Вычисление **постадаптационных колбочковых откликов (ρ_a, γ_a, β_a):**

$$\rho_a = B_{\rho u}\left\{f_n[F_L F_\rho (L_A/L_C)^c \rho]/W\right\} + 1$$
$$\gamma_a = B_{\gamma u}\left\{f_n[F_L F_\gamma (L_A/L_C)^c \gamma]/W\right\} + 1,$$
$$\beta_a = B_{\beta u}\left\{f_n[F_L F_\beta (L_A/L_C)^c \beta]/W\right\} + 1$$

где

$$B_{\rho u} = 10^7/[10^7 + (5L_A)3\rho_C/(\rho_C + \gamma_C + \beta_C)]$$
$$B_{\gamma u} = 10^7/[10^7 + (5L_A)3\gamma_C/(\rho_C + \gamma_C + \beta_C)],$$
$$B_{\beta u} = 10^7/[10^7 + (5L_A)3\beta_C/(\rho_C + \gamma_C + \beta_C)]$$

где ρ_C, γ_C, β_C — это ργβ-значения по сопрягающему полю, а $f_n[I] = 40[I^{0.73}/(I^{0.73}+2)]$.

Типичное значение c — 0.2. Если сопрягающего поля нет, то $\rho_C = \rho_a$, $\gamma_C = \gamma_a$ и $\beta_C = \beta_a$ (и поскольку $\rho_a = \gamma_a = \beta_a$, то отношения, что следуют за $5L_A$ в уравнениях $B_{\rho u}$, $B_{\gamma u}$ и $B_{\beta u}$, сокращаются до единицы).

Шаг 7

Вычисление **постадаптационного ахроматического отклика** (A_a), **постадаптационных оппонентных откликов** (C_1, C_2, C_3) и **координат** a и b:

$$A_a = 2\rho_a + \gamma_a + (1/20)\beta_a - 3.05 + 1$$
$$C_1 = \rho_a - \gamma_a$$
$$C_2 = \gamma_a - \beta_a$$
$$C_3 = \beta_a - \rho_a$$
$$a = C_1 - C_2/11$$
$$b = 0.5(C_2 - C_3)/4.5$$

Шаг 8

Вычисление величины коррелята **цветового тона** (h):

$$h = \arctan(b/a).$$

Коррелят цветового тона (h) лежит между 0° и 90°, если a и b положительны; между 90° и 180°, если a отрицательно, b — положительно; между 180° и 270° — если a и b отрицательны; между 270° и 360° — если a положительно, b — отрицательно.

Шаг 9

Вычисление **квадратуры цветового тона** (H):

$$H = H_1 + \frac{100(h - h_1)/e_1}{(h - h_1)/e_1 + (h_2 - h)/e_2},$$

где H_1 — это 0, 100, 200 либо 300 согласно однозначным красному, желтому, зеленому и синему соответственно, а h — величина однозначного цветового тона, имеющего ближайшее меньшее значение к цветовому тону исследуемого стимула.

	h	e
Красный	20.14	0.8
Желтый	90.00	$0.7[L/(L+10)] + 0.3[10/(L+10)]$
Зеленый	164.25	1.0
Синий	237.53	$1.2[L/(L+10)] + 0.2[10/(L+10)]$

где e_1 и h_1 — это соответственно e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее меньшее значение h, а e_2 и h_2 — e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее большее значение h.

Шаг 10

Вычисление **состава цветового тона** (H_C), где H_p — это цифры после сотых H, если:

$H = H_p$, состав цветового тона H_p Желтый	$100 - H_p$ Красный
$H = 100 + H_p$, состав цветового тона H_p Зеленый	$100 - H_p$ Желтый
$H = 200 + H_p$, состав цветового тона H_p Синий	$100 - H_p$ Зеленый
$H = 300 + H_p$, состав цветового тона H_p Красный	$100 - H_p$ Синий

Шаг 11

Вычисление **коэффициента эксцентричности** (e):

$$e = e_1 + (e_2 - e_1)(h - h_1)/(h_2 - h_1),$$

где e_1 и h_1 — это соответственно e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее меньшее значение h, а e_2 и h_2 — e- и h-величины однозначных цветовых тонов, имеющих ближайшее большее значение h.

Шаг 12

Вычисление **низкояркостного тританопического коэффициента** (F_{tu}):

$$F_{tu} = L/(L + 0.1)$$

$$b_{tu} = bF_{tu}$$

Шаг 13

Вычисление величин коррелятов **чистоты цвета** (s) и **полноты цвета** (M):

$$s = \frac{\sqrt{50(a^2 + b_{tu}^2)}100e(10/13)N_c}{\rho_a + \gamma_a + (21/20)\beta_a}$$

$$M = sF_L^{0.15}$$

Шаг 14

Вычисление **коэффициента адаптации по скотопической яркости** (F_{LS}):

$$F_{LS} = 3800j^2\,5L_{AS}/2.26 + 0.2(1 - j^2)^4 \sqrt[6]{(5L_{AS}/2.26)},$$

где:

$$j = 0.00001/(5L_{AS}/2.26 + 0.00001)$$

Шаг 15

Вычисление **скотопического ахроматического отклика** (A_S):

$$A_S = B_{su}(3.05)\left\{f_n\left[F_{LS}(L_{AS}/L_{CS})^c\sqrt{L_S/2.26}\right]\right\} + 0.3,$$

где:

$$B_{su} = 0.5/[1+0.3\sqrt[3]{(5L_{AS}/2.26)\sqrt{L_S/2.26}}] + 0.5/[1+5(5L_{AS}/2.26)]$$

и

$$f_n[I] = 40[I^{0.73}/(I^{0.73}+2)]$$

Типичное значение c — 0.2.

Шаг 16
Вычисление **общего ахроматического отклика:**

$$A = A_a + A_s - 2.31$$

(−2.31 получено как $-2.05 - 1 - 0.3 + \sqrt{1^2 + 0.3^2}$).

Шаг 17
Вычисление:

$$A + (M/100)$$

Шаг 18
Вычисление величины коррелята **субъективной яркости** (Q):

$$Q = \{[1.1][A + (M/100)]\}^{0.9}$$

Шаг 19
Сведéние в таблицу значений H, H_C, M, s и Q.

36.5.3 Рабочий пример

Проиллюстрирует работу модели следующий пример:

	x	y	L
Образец (исследуемый стимул)	0.3580	0.3900	L
Адаптирующее поле	1/3	1/3	$L^{2/3}/200$
Сопрягающее поле	1/3	1/3	$L^{2/3}/200$

Предполагается, что скотопические яркости, деленные на 2.26, равны фотопическим ($L_S/2.26 = L$) по равноэнергетическому стимулу.

Коэффициент хроматической индукции (N_c) равен 0.5.

Результаты цветового восприятия образца прогнозируются при переходе его фотометрической яркости от 100000 кд/м^2 к 0.000001 кд/м^2.

Предикторы:

L	H	H_c	M	s	Q
100 000	142	58Y 42G	5.8	2	84.2
10 000	143	57Y 43G	14.7	7	80.4
1000	143	57Y 43G	23.7	16	67.3
100	145	55Y 45G	18.3	25	44.8
10	152	48Y 52G	4.5	22	22.1
1	162	38Y 62G	0.6	7	10.3
0.1	164	36Y 64G	0.1	1	4.8
0.01	–	–	0.0	0	2.6
0.001	–	–	0.0	0	1.7
0.0001	–	–	0.0	0	1.3
0.00001	–	–	0.0	0	1.2
0.000001	–	–	0.0	0	1.1

В приведенных данных можно отследить следующие тенденции:

— полнота цвета стимула (M) растет от нуля на скотопических уровнях фотометрической яркости до максимума при 1000 кд/м^2, а затем вновь падает (поскольку при 1000 кд/м^2 был достигнут максимум отклика зрительной системы);

— чистота цвета (s) в основной части фотопического диапазона яркостей меняется весьма незначительно ;

— субъективная яркость (Q) растет от очень низких цифр на скотопических уровнях яркости до 80 при 10000 кд/м^2, после чего темп роста радикально падает, поскольку достигается максимум зрительного отклика;

— состав цветового тона (H_C) демонстрирует сдвиг от 57Y 43G на высоких уровнях яркости стимула до примерно 37Y 63G на низких фотопических уровнях (эффект Бецольда — Брюкке).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Helson, H., J. Experimental Psychology, 23, 439 (1938).

Hunt, R.W.G., Color Res. Appl., 14, 238 (1989).

Hunt, R.W.G., Measuring Colour, 3rd Edn. Fountain Press, Kingston-upon-Thames (1998).

Hurvich, L.M., and Jameson, D., J. Opt. Soc. Amer., 41, 521 (1951).

MacAdam, D.L., J. Opt. Soc. Amer. 40, 589 (1950).

37 ИНДЕКСЫ ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

37.1 ВВЕДЕНИЕ

Мы знаем, что среднеквадратичная гранулярность изображений хорошо коррелирует с их визуальной зернистостью, а физическая резкость — с резкостью визуальной (см. гл. 18). Однако единой общепринятой системы оценки качества *цветовоспроизведения* до сих пор не существует.

Одна из причин такого положения дел состоит в том, что визуальные зернистость и резкость — это одномерные показатели, тогда как цвет — пятимерен.

Вторая причина — в том, что условия просмотра изображений чаще всего отличны от условий просмотра оригиналов, а традиционная (базовая) колориметрия не справляется с задачей прогнозирования результатов цветового восприятия стимулов, предъявляемых в нестандартных условиях просмотра. Однако появление и развитие моделей цветового восприятия (в частности, тех, что описаны в гл. 35) дало возможность учитывать отличия в просмотровых условиях, и почти одновременно с этим американский исследователь Михаэль Пойнтер предложил методы решения проблемы многомерности цветового ощущения. Первое и второе привели в итоге к появлению т.н. *индекса цветовоспроизведения* (Pointer, 1986).

Однако даже тогда, когда условия просмотра оригинала совпадают с условиями просмотра репродукции, все равно имеет смысл применять ту или иную модель цветового восприятия, поскольку сие дает точные данные о цветовом тоне — атрибуте цветового ощущения, который чаще всего оказывается важнее прочих.

37.2 РАСЧЕТ ИНДЕКСА ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Расчет индекса цветовоспроизведения идет в несколько этапов.

ЭТАП 1. Определение эталонных и тестовых условий просмотра

Цветовоспроизведение всегда предполагает наличие оригинала, в роли которого может выступать либо реальная сцена, либо ее изображение.

Исходный (оригинальный) материал объявляется *эталонным*, а условия его просмотра — *эталонными просмотровыми условиями* (*эталонными условиями*).

Цветовую репродукцию оригинала называют *тестом*, а условия ее просмотра — *тестовыми условиями просмотра* (*тестовыми условиями*).

Итак, к примеру, эталоном может выступить некая цветовая карта (допустим, GretagMacbeth DC Checker), а эталонными условиями — условия ее рассматривания, скажем, на дневном свету; тестом может явиться фотография этой карты, а тестовыми условиями — условия просмотра последней, скажем, при свете ламп накаливания.

ЭТАП 2. Измерение или вычисление фотометрических и колориметрических показателей при эталонных и тестовых условиях просмотра

Требуются следующие данные:

Эталонные условия	Фотометрическая яркость адаптирующего стимула (L_A)
	Трехстимульные значения интересующего стимула (XYZ)
Тестовые условия	Фотометрическая яркость адаптирующего стимула (L_A)
	Трехстимульные значения интересующего стимула (XYZ)

ЭТАП 3. Применение модели цветового восприятия с целью расчета величин — коррелятов цветового ощущения от исследуемого образца в эталонных и в тестовых условиях

Эталонные условия	Цветовой тон, светлота (или субъективная яркость), насыщенность (или полнота цвета)
Тестовые условия	Цветовой тон, светлота (или субъективная яркость), насыщенность (или полнота цвета)

Вычисление перцепционных отличий между эталонным стимулом и стимулом тестовым:
— по цветовому тону (ΔH);
— по светлоте (ΔJ) или субъективной яркости (ΔQ);
— по насыщенности (ΔC) или полноте цвета (ΔM).

Отметим, что в большинстве случаев предпочтительно использование светлоты, а не субъективной яркости стимула.

Если фотометрические яркости адаптирующих стимулов в эталонных и в тестовых условиях одинаковы, то в качестве третьего показателя можно использовать как показатель насыщенности, так и полноты цвета. Но если фотометрические яркости адаптирующих стимулов разные, то выбор определяется тем, требуется ли учет влияния величины фотометрической яркости на выраженность цветового тона исследуемого стимула: если да — используется показатель полноты цвета; если нет (например, когда в силу вступает когнитивная компенсация) — насыщенности.

ЭТАП 4. Вычисление доли цветового тона в восприятии стимулов оригинала и репродукции в эталонных и в тестовых условиях

В диагностике результатов, полученных с применением индекса цветовоспроизведения, весьма полезно определить ментальную долю четырех однозначных цветовых тонов в результирующем цветовом ощущении, в частности в таком его атрибуте, как цветовой тон. К примеру, у цветового ощущения с составом цветового тона 75G 25Y доли однозначных тонов будут таковы:

R = 0   Y = 25   G = 75   B = 0

ЭТАП 5. Вычисление абсолютных и относительных цветовых отличий по основным сегментам цветового пространства

Если репродукционные отличия усреднить, а равные и оппозитные величины удалить, то очевидно, что результирующее отличие между оригиналом и репродукцией станет равным нулю. Следовательно, в первую очередь необходимо знать среднюю величину отличий без учета их направления (знака). Среднее отличие, рассчитанное без учета его *направления*, называется *абсолютной цветорепродукционной погрешностью*.

Вместе с тем очень важно знать и направление погрешности. Поэтому среднее вычисляется в том числе и с учетом знака, а результат такого вычисления именуется *относительной цветорепродукционной погрешностью*.

Следовательно, абсолютная цветорепродукционная погрешность указывает только на величину средней ошибки цветовоспроизведения, а относительная — на среднее направление этой ошибки. Нулевое значение последней укажет на то, что отличия равнобалансны по направлению.

Абсолютная и относительная цветорепродукционные погрешности вычисляются следующим образом:

— ΔH, ΔJ (или ΔQ), ΔC (или ΔM) по каждой паре стимулов (т.е. эталонному и тестовому) согласуются с долевыми отличиями по цветовому тону;

— для получения величины абсолютной цветорепродукционной погрешности в каждом сегменте цветового пространства вычисляются средневзвешенные отличия без учета их знака;

— аналогично при получении величины относительной цветорепродукционной погрешности по каждому сегменту цветового пространства вычисляются средневзвешенные отличия с учетом их знака.

Пример:

Цветорепродукционные погрешности

АБСОЛЮТНАЯ	Красный	Желтый	Зеленый	Синий
ΔH	6.3	9.4	14	13.4
ΔJ	7.6	7.8	7.2	5.9
ΔC	10.5	8.1	11.7	10.9
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ	Красный	Желтый	Зеленый	Синий
ΔH	2.2	−7.6	1.9	−5.3
ΔJ	−7.2	−7.7	−7.2	−5.2
ΔC	6.9	0	−11.6	−5.6

ЭТАП 6. Вычисление индекса цветовоспроизведения и направления средней погрешности по каждому сегменту цветового пространства

Удобно, когда индексы цветовоспроизведения приравнены к 100 при нулевых абсолютных погрешностях и прогрессивно падают по мере роста этих погрешностей. Сие достигается следующим образом:

— дабы получить индекс цветовоспроизведения по цветовому тону, светлоте (субъективной яркости) и насыщенности (полноте цвета) в основных сегментах цветового пространства, величина каждой абсолютной цветорепродукционной погрешности вычитается из 100;

— для выявления направления средней погрешности в каждом сегменте цветового пространства применяется показатель относительной цветорепродукционной погрешности.

По тестируемому образцу результаты будут иметь следующий вид (пример):

Индексы цветовоспроизведения

	Красный	Желтый	Зеленый	Синий	Среднее
Цветовой тон	93.7	90.6	86.0	86.6	89.2
	К → Ж	Ж → К	З → С	С → З	
Светлота	92.4	92.2	92.8	94.1	92.2
	Темнее	Темнее	Темнее	Темнее	
Насыщенность	89.5	91.9	88.3	89.1	89.7
	Выше	Та же	Ниже	Ниже	

Общий индекс: 91

Двенадцать полученных индексов помогают управлять репродукционным процессом, но на некоторых этапах порой лишь ответить на вопрос «нужна ли корректировка в принципе?» (для чего и требуется некий общий индекс). Иными словами, расчет и использование общего индекса никак не грешит пресловутым «мономеризмом», потому как в данном случае нужно лишь выяснить, вводить изменения в процесс или нет?

В приведенном примере общий индекс дан как среднее арифметическое из двенадцати самостоятельных цифр, однако можно выполнить и более сложный расчет, позволяющий получить данные по каждому из сегментов цветового тела и точнее определить погрешность как по цветовому тону, так и по светлоте и насыщенности.

37.3 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИНДЕКСА ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Индекс цветовоспроизведения протестировали в ряде опытов (Wood, Pointer, Attridge и Jacobson, 1987; Attridge, Pointer и Reid, 1991; Attridge, Pointer, Jacobson и Erlandsson, 1992; Attridge, Pointer, Jacobson и Nott, 1993; Attridge, Pointer и Jacobson, 1996), один из которых коротко мы опишем ниже (Attridge, Pointer и Reid, 1991).

Некие сцены фотографировались на негативную пленку: вначале на каждой пленке фиксировалась самоя сцена, а затем, следующим кадром, — карта GretagMacbeth ColorChecker, помещенная в эту же сцену, причем так, чтобы карта эта занимала почти все поле кадра (McCamy, Marcus и Davidson, 1976). Сие выполнили в четырех раз-

ных сценах, акцентированных листвой (сцена G), небом (сцена B), кожей европеоида (C)[1] и пляжным песком (S)[2].

Негативы по G-сцене обозначили как G_1, а по снятой в ней карте — G_2; аналогично по другим сценам. После чего с негативов выполнили отпечатки и оценили их по схеме, описанной ниже.

Шаг 1. Установки фотопринтера подобрали так, чтобы нейтральные поля карты на снимке G_2 выглядели нейтрально на отпечатке.

Шаг 2. Со снимков G_1 и G_2 выполнили серию отпечатков с разными вариантами отклонения параметров принтера от нормы, в частности — в красном, зеленом, синем, голубом, пурпурном и желтом направлениях (зональные оптические плотности отклонялись при этом от нейтральной позиции на ±0.3).

Шаг 3. Повтор шагов 1 и 2 по негативам B_1, B_2, C_1, C_2, S_1 и S_2.

Шаг 4. Выполнили визуальную оценку качества изображений сцен (G_1, B_1, C_1 и S_1) и сравнили ее результаты с индексами цветовоспроизведения, полученными из колориметрии отпечатков карты (G_2, B_2, C_2 и S_2), а также с индексами, полученными с использованием предшественника CIECAM97s — модели Hunt 94 (Hunt, 1991; Hunt, 1994), позволявшей определить величины коррелятов цветового тона (H), светлоты (J) и полноты цвета (M).

Общий индекс (I) был высчитан по уравнению:

$$I = (2I_H + I_J + I_M)/4,$$

где I_H — это индекс цветовоспроизведения по цветовому тону, I_J — по светлоте, I_M — по полноте цвета.

Изображения предъявлялись 10 наблюдателям при искусственном дневном свете с коррелированной цветовой температурой 6500 К и при освещенности 1650 лк. Оценка выполнялась по пятибалльной шкале:

1 — отлично;
2 — хорошо;
3 — удовлетворительно;
4 — плохо;
5 — неприемлемо.

Шаг 5. Построили графики, где по осям абсцисс отложили результаты визуальной оценки, а по осям ординат — индексы цветовоспроизведения (рис. 37.1).

Итак, по рис. 37.1 мы видим, что имеет место очевидная корреляция между общим индексом цветовоспроизведения (I) и наблюдательским рейтингом. Кучкование точек в правом конце графиков по сценам C и S указывает на даже еще более высокую корреляцию, которая была бы достигнута, если бы в наблюдательской шкале присутствовала шестая категория, к примеру, «безобразно плохо». Полученные результаты свидетельствуют о том, что качество цветовоспроизведения можно вполне эффективно оце-

[1] От «Caucasian skin» — кожа европеоида. — *Прим. пер.*
[2] От «Sandy beach». — *Прим. пер.*

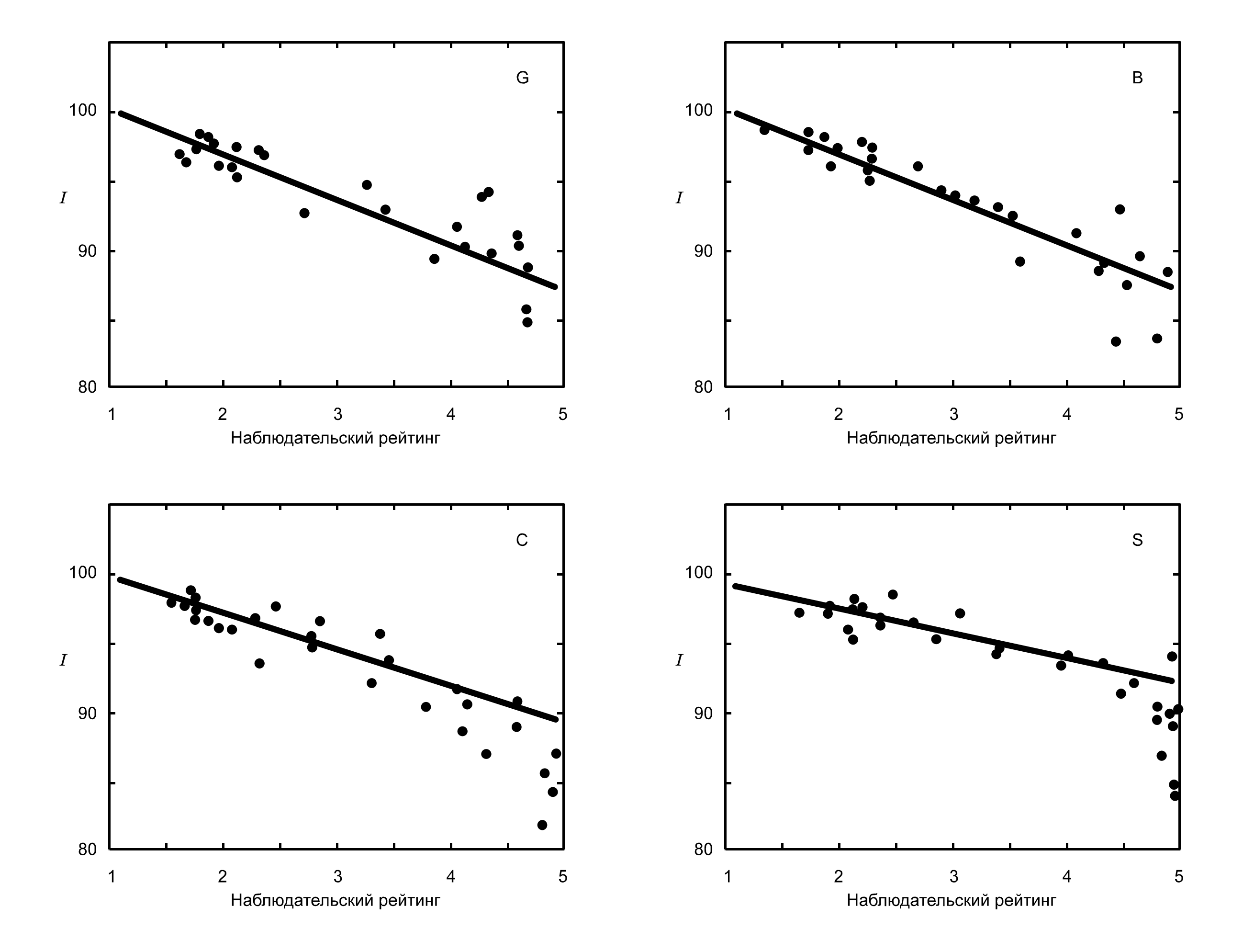


Рис. 37.1 Общий индекс цветовоспроизведения (*I*) как функция от наблюдательского оценочного рейтинга по четырем сценам: G — сцена, акцентированная листвой; B — сцена, акцентированная ясным небом; C — кожей европеоида; B — пляжным песком.

нить с помощью индекса цветовоспроизведения, рассчитанного при поддержке той или иной модели цветового восприятия и с использованием той или иной тест-карты.

Дальнейшую работу направили на оценку применимости описанного метода в прочих сферах работы с изображениями, а также определение того, может ли выбор иных цветовых патчей (иных, чем те, что представлены в ColorChecker) усовершенствовать методику расчета индекса.

Стоит отметить также, что при работе со стимулами малого пространственного размера угловое расстояние между ними влияет на тактику оценки цветовых отличий. Учет этого фактора позволяет выполнить S-CIELAB-метрика, в которую включена т.н. *система пространственной фильтрации оппонентных стимулов* (Zhang и Wandell, 1996).

Наконец, отметим, что применение специальной тест-карты предпочтительнее колориметрии объектов фактической сцены, поскольку последнее сопряжено с рядом трудностей, усугубляемых, в частности, неравномерностью освещения, текстурами, а также паразитной подсветкой и виньетированием в фотокамере и в принтере (см. также Jacobson, Attridge, Pointer и Parmar, 1994).

ПРЕДМЕТНЫЕ ССЫЛКИ

Attridge, G.G., Pointer, M.R., Jacobson, R.E., and Erlandsson, E., J. Photogr. Sci., 40, 14 (1992).

Attridge, G.G., Pointer, M.R., Jacobson, R.E., and Erlandsson, E., J. Photogr. Sci., 44, 187 (1996).

Attridge, G.G., Pointer, M.R., Jacobson, R.E., and Nott, A-M., J. Photogr. Sci., 41, 11 (1993).

Attridge, G.G., Pointer, M.R., and Reid, D.G., J. Photogr. Sci., 39, 183 (1991).

Hunt, R.W.G., Measuring Colour., 2nd Edn., Chapter 12, Ellis Horwood, Chichester (1991).

Hunt, R.W.G., Color Res. Appl., 19, 23 (1994).

Jacobson, R.E., Attridge, G.G., Pointer, M.R., and Parmar, P., J. Photogr. Sci., 42, 80 (1994).

McCamy, C.S., Marcus, H., and Davidson, J.G., J. Appl. Photogr. Engng., 2, 95 (1976).

Pointer, M.R., J. Photogr., Sci., 34, 81 (1986).

Wood, C.A., Pointer, M.R., Attridge, G.G., and Jacobson, R.E., J. Photogr. Sci., 35, 66 (1987).

Zhang, X., and Wandell, B., SID Symposium Technical Digest, 27, 731 (1996).

ПРИЛОЖЕНИЯ

П1 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ МАТРИЦЫ

П1.1 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Матричная алгебра весьма подходит к разного рода колориметрическим расчетам, выполняемым, например, при маскировании, сканировании, теоретических построениях и пр. В данном Приложении мы сделаем краткий экскурс к основам матричной алгебры и дадим ряд примеров ее применения в базовой колориметрии (колориметрии цветовых воздействий. — *Прим. пер.*).

Итак, матрица — это массив цифр или символов. К примеру, обе записи:

$$\begin{matrix} 271 & 18 \\ 671 & 12 \end{matrix} \quad \text{или} \quad \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{matrix}$$

являются матрицами.

Если две матрицы равны друг другу, каждый показатель первой матрицы равен соответствующему показателю второй матрицы, например, уравнение:

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 + b \\ y_1 + c & y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 61 & d + 3e \\ 12 & 6f \end{pmatrix}$$

представляет собой вариант записи четырех уравнений:

$$\begin{matrix} x_1 = 61 & x_2 + b = d + 3e \\ y_1 + c = 12 & y_2 = 6f \end{matrix}$$

Когда система уравнений записывается в матричной форме, то систему эту можно упростить путем разложения на множители, к примеру, система из двух уравнений:

$$a_1 x + a_2 y = a_5$$
$$a_3 x + a_4 y = a_6$$

в матричной форме записывается как:

$$\begin{pmatrix} a_1 x + a_2 y \\ a_3 x + a_4 y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_5 \\ a_6 \end{pmatrix},$$

а после разложения на множители:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_5 \\ a_6 \end{pmatrix}$$

Таким образом, в матричной алгебре действует т.н. *правило умножения*, и в данном случае элементы первого ряда первой матрицы последовательно умножаются на элементы колонки второй матрицы, а результат суммируется, давая элементы первого ряда матричного произведения. Элементы второго ряда матричного произведения получаются аналогичным образом из элементов второго ряда первой матрицы.

Итак, в общем виде правило умножения звучит так:

⇨ Элемент, находящийся в m-ряду и n-колонке матричного произведения, является суммой последовательных умножений элементов m-ряда первой матрицы на элементы n-колонки второй матрицы.

Таким образом:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} a_1b_1+a_2b_2 & a_1b_3+a_2b_4 \\ a_3b_1+a_4b_2 & a_3b_3+a_4b_4 \end{pmatrix}$$

В матричной форме математические преобразования выглядят компактно и просто. Если, к примеру:

$$\begin{aligned} a_1x+a_2y&=a_5 \\ a_3x+a_4y&=a_6 \\ b_1x'+b_3y'&=x \\ b_2x'+b_4y'&=y \end{aligned},$$

то в матричном представлении эта система будет записана так:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} a_5 \\ a_6 \end{pmatrix},$$
$$\begin{pmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

и следовательно:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} a_5 \\ a_6 \end{pmatrix}$$

Правомочность такой замены легко проверить перемножением матриц и сравнением с двумя уравнениями, полученными обычным способом. Стоит отметить, однако, что последовательность матриц критична и не должна меняться, к примеру: если две исходных матрицы обозначить как A и B, то $A \cdot B \neq B \cdot A$.

Матричная алгебра очень удобна в решении систем уравнений, часто встречающихся при колориметрических вычислениях. С целью упрощения вычислений используются две вторичных матрицы:

$A' =$ *транспозиция* A-матрицы, получаемая записью рядов как колонок и колонок как рядов;

adj. $A =$ *дополнительная* (*сопряженная*) к A-матрице, получаемая путем замены каждого элемента исходной матрицы на определитель этой же матрицы, но с вычеркнутыми рядом и колонкой данного элемента и с последующим транспонированием ре-

зультата такой замены; нечетные элементы вписываются в новую матрицу со знаком «минус», к примеру, если:

$$A=\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{pmatrix},$$

то

$$A'=\begin{pmatrix} a_1 & a_4 & a_7 \\ a_2 & a_5 & a_8 \\ a_3 & a_6 & a_9 \end{pmatrix} \text{ и adj.} A=\begin{pmatrix} |A_1| & -|A_4| & |A_7| \\ -|A_2| & |A_5| & -|A_8| \\ |A_3| & -|A_6| & |A_9| \end{pmatrix},$$

где

$$|A_1|=a_5a_9-a_6a_8,$$

$$|A_2|=a_4a_9-a_6a_7,$$

и т. д.

Обратная, или *реципрокальная,* матрица A^{-1} — это матрица, которая выражает решение системы уравнений, например:

$$\text{если} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}=A\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}, \text{ то } \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}=A^{-1}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}.$$

С помощью простой алгебры легко показать, что обратная матрица рассчитывается как:

$$A^{-1}=\frac{\text{adj.} A}{|A|},$$

где $|A|$ — это определитель, соответствующий A-матрице. Следовательно, если:

$$A=\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{pmatrix} \text{ и } |A|=\begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{vmatrix},$$

то $|A|=a_1(a_5a_9-a_6a_8)-a_2(a_4a_9-a_6a_7)+a_3(a_4a_8-a_5a_7)$.

П1.2 ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦ В КОЛОРИМЕТРИИ

Типичной колориметрической задачей является следующая: в некоем треугольнике цветностей, скажем XYZ, даны позиции трех кардинальных (воспроизводящих) стимулов (R, G и B) некоей трихроматической цветовоспроизводящей системы. Требуется найти уравнения преобразования, позволяющие перенести в этот треугольник ре-

зультаты, полученные с использованием этой системы, при условии, что равновеликие колориметрические количества кардинальных RGB-стимулов воспроизводят некий белый стимул W. Следовательно, в общем виде ситуация будет выглядеть так:

$$\begin{aligned}
&(\mathrm{R}) \propto a_1(\mathrm{X}) + a_2(\mathrm{Y}) + a_3(\mathrm{Z})\\
&(\mathrm{G}) \propto a_4(\mathrm{X}) + a_5(\mathrm{Y}) + a_6(\mathrm{Z})\\
&(\mathrm{B}) \propto a_7(\mathrm{X}) + a_8(\mathrm{Y}) + a_9(\mathrm{Z})\ ,\\
&(\mathrm{W}) \propto h_1(\mathrm{X}) + h_2(\mathrm{Y}) + h_3(\mathrm{Z})\\
&(\mathrm{W}) \propto j_1(\mathrm{X}) + j_2(\mathrm{Y}) + j_3(\mathrm{Z})
\end{aligned}$$

где сумма коэффициентов в каждом из уравнений равна единице (к примеру: $a_1 + a_2 + a_3 = 1$).

Весьма удобно ввести постоянные k_1, k_2 и k_3, так как сие позволяет уйти от знака пропорциональности, заменив его знаком эквивалентности:

$$\begin{aligned}
&k_1(\mathrm{R}) \equiv a_1(\mathrm{X}) + a_2(\mathrm{Y}) + a_3(\mathrm{Z})\\
&k_2(\mathrm{G}) \equiv a_4(\mathrm{X}) + a_5(\mathrm{Y}) + a_6(\mathrm{Z}),\\
&k_3(\mathrm{B}) \equiv a_7(\mathrm{X}) + a_8(\mathrm{Y}) + a_9(\mathrm{Z})
\end{aligned}$$

а также постоянную k_4, позволяющую переписать уравнения по W:

$$\begin{aligned}
&k_4(\mathrm{W}) \equiv H_1(\mathrm{X}) + H_2(\mathrm{Y}) + H_3(\mathrm{Z}),\\
&k_4(\mathrm{W}) \equiv J_1(\mathrm{X}) + J_2(\mathrm{Y}) + J_3(\mathrm{Z})
\end{aligned}$$

где H_1, H_2 и H_3 пропорциональны соответственно h_1, h_2 и h_3, но представляют фактические количества кардинальных RGB-стимулов, необходимые уравниванию (т.е. воспроизведению) белого стимула W, и где J_1, J_2 и J_3 пропорциональны соответственно j_1, j_2 и j_3 (j_2 — это коэффициент фотометрической яркости стимула W).

Теперь нам нужно определить величины k_1, k_2 и k_3. Чтобы выполнить сие, необходимо решить приведенные выше уравнения по (X), (Y) и (Z).

Самый удобный способ решения — матричный. При этом потребуется найти матрицу, обратную

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{pmatrix}.$$

Если последнюю обозначить как A, то:

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|}\begin{pmatrix} a_5a_9 - a_6a_8 & -(a_4a_9 - a_6a_7) & a_4a_8 - a_5a_7 \\ -(a_2a_9 - a_3a_8) & a_1a_9 - a_3a_7 & -(a_1a_8 - a_2a_7) \\ a_2a_6 - a_3a_5 & -(a_1a_6 - a_3a_4) & a_1a_5 - a_2a_4 \end{pmatrix}' = \frac{1}{|A|}\begin{pmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ b_4 & b_5 & b_6 \\ b_7 & b_8 & b_9 \end{pmatrix}' = \frac{1}{|A|}\begin{pmatrix} b_1 & b_4 & b_7 \\ b_2 & b_5 & b_8 \\ b_3 & b_6 & b_9 \end{pmatrix}$$

Когда $a_1 + a_2 + a_3 = a_4 + a_5 + a_6 = a_7 + a_8 + a_9 = 1$ (типичный случай), то:

$$|A| = b_1 + b_4 + b_7 = b_2 + b_5 + b_8 = b_3 + b_6 + b_9.$$

Поскольку решение последнего выражения предельно просто, то сие позволяет проверить каждый элемент матрицы.

Разделив каждый элемент матрицы на $|A|$, получим:

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{pmatrix}$$

В качестве финальной проверки выражение $c_1 + c_2 + c_3 = c_4 + c_5 + c_6 = c_7 + c_8 + c_9 = 1$ должно быть истинным.

Теперь мы можем написать:

$$1.0(\mathrm{X}) \equiv c_1 k_1 (\mathrm{R}) + c_2 k_2 (\mathrm{G}) + c_3 k_3 (\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{Y}) \equiv c_4 k_1 (\mathrm{R}) + c_5 k_2 (\mathrm{G}) + c_6 k_3 (\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{Z}) \equiv c_7 k_1 (\mathrm{R}) + c_8 k_2 (\mathrm{G}) + c_9 k_3 (\mathrm{B})$$

а заменяя (X), (Y) и (Z) в уравнении

$$k_4 (\mathrm{W}) = J_1 (\mathrm{X}) + J_2 (\mathrm{Y}) + J_3 (\mathrm{Z})$$

и сравнивая результат с уравнением

$$k_4 (\mathrm{W}) = H_1 (\mathrm{R}) + H_2 (\mathrm{G}) + H_3 (\mathrm{B}),$$

мы получим:

$$k_1 = H_1 / (J_1 c_1 + J_2 c_4 + J_3 c_7)$$
$$k_2 = H_2 / (J_1 c_2 + J_2 c_5 + J_3 c_8)$$
$$k_3 = H_3 / (J_1 c_3 + J_2 c_6 + J_3 c_9)$$

Итак, коэффициенты k_1, k_2 и k_3 вычислены и уравнения преобразования выглядят следующим образом:

$$1.0(\mathrm{R}) \equiv (a_1 / k_1)(\mathrm{X}) + (a_2 / k_1)(\mathrm{Y}) + (a_3 / k_1)(\mathrm{Z})$$
$$1.0(\mathrm{G}) \equiv (a_4 / k_2)(\mathrm{X}) + (a_5 / k_2)(\mathrm{Y}) + (a_6 / k_2)(\mathrm{Z})$$
$$1.0(\mathrm{R}) \equiv (a_7 / k_3)(\mathrm{X}) + (a_8 / k_3)(\mathrm{Y}) + (a_9 / k_3)(\mathrm{Z})$$

Уравнения обратного преобразования запишутся так:

$$1.0(\mathrm{X}) \equiv c_1 k_1 (\mathrm{R}) + c_2 k_2 (\mathrm{G}) + c_3 k_3 (\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{Y}) \equiv c_4 k_1 (\mathrm{R}) + c_5 k_2 (\mathrm{G}) + c_6 k_3 (\mathrm{B})$$
$$1.0(\mathrm{Z}) \equiv c_7 k_1 (\mathrm{R}) + c_8 k_2 (\mathrm{G}) + c_9 k_3 (\mathrm{B})$$

Отметим, что обычно сумма коэффициентов в данных уравнениях не равна единице.

Довольно часто бывает удобным переписать приведенные выше уравнения в виде зависимостей между трехстимульными значениями (см. раздел 8.4):

$$X = (a_1/k_1)R + (a_4/k_2)G + (a_7/k_3)B$$

$$Y = (a_2/k_1)R + (a_5/k_2)G + (a_8/k_3)B$$

$$Z = (a_3/k_1)R + (a_6/k_2)G + (a_9/k_3)B$$

$$R = c_1k_1X + c_4k_1Y + c_7k_1Z$$

$$G = c_2k_2X + c_5k_2Y + c_8k_2Z$$

$$B = c_3k_3X + c_6k_3Y + c_9k_3Z$$

Вновь отметим, что обычно сумма коэффициентов в данных уравнениях не равна единице.

Если $H_1 = H_2 = H_3$ и $J_1 = J_2 = J_3$, то в правой части приведенных выше уравнений суммы коэффициентов по (R), (G) и (B) всегда равны H/J. То же относится к коэффициентам по X, Y и Z. Сумма коэффициентов по (X), (Y) и (Z) всегда равна J/H, и то же относится к коэффициентам по R, G и B. Если $J = H$, то понятно, что сумма коэффициентов равна единице.

П2 КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ТАБЛИЦЫ

П2.1 ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В данном приложении рассматривается методика расчета колориметрических показателей[1] из спектрофотометрических данных.[2] Спектрофотометрические данные можно представить в двух вариантах: либо в виде количеств света (фотометрические единицы) по каждой из длин волн видимого спектра, либо в виде количеств энергии (радиометрические единицы) по каждой из длин волн.

П2.1.1 Колориметрическое вычисление из фотометрических величин

В данном случае расчеты выполняются с применением закона центра тяжести смеси стимулов (см. разделы 7.6, 8.5 и 8.6). Если количества света по длинам волн λ_1, λ_2, λ_3 и т.д. равны L_1, L_2, L_3 и т.д., то цветность результирующей смеси определяется вычислением центра тяжести весов:

L_1/y_1 на x_1/y_1
L_2/y_2 на x_2/y_2
L_3/y_3 на x_3/y_3
и т.д.

где x_1y_1, x_2y_2, x_3y_3 и т.д. — координаты цветности (в системе XYZ) монохроматических стимулов с длинами волн соответственно λ_1, λ_2, λ_3 и т.д. Координаты цветности центра тяжести ($x_m y_m$) такой системы рассчитываются по уравнениям:

$$x_m = \frac{x_1 L_1/y_1 + x_2 L_2/y_2 + x_3 L_3/y_3 + \ldots}{L_1/y_1 + L_2/y_2 + L_3/y_3 + \ldots}$$

$$y_m = \frac{y_1 L_1/y_1 + y_2 L_2/y_2 + y_3 L_3/y_3 + \ldots}{L_1/y_1 + L_2/y_2 + L_3/y_3 + \ldots}$$

$$= \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \ldots}{L_1/y_1 + L_2/y_2 + L_3/y_3 + \ldots},$$

в которые можно подставить значения из таблиц раздела П2.2: величины x и y в этих таблицах даны по монохроматам диапазона от 380 до 780 нм (шаг 10 нм).

[1] Т.е. показателей *цветовых воздействий* стимулов на зрительную систему наблюдателя. — *Прим. пер.*

[2] Т.е. *физических характеристик* стимулов. — *Прим. пер.*

П2.1.2 Колориметрическое вычисление из радиометрических величин

В данном случае вычисления выполняются из величин мощности (энергии) стимула по каждой из длин волн — $e(\lambda)$. Понятно, что величины эти вначале следует конвертировать в величины фотометрические умножением каждого значения $e(\lambda)$ на соответствующее значение функции спектральной фотопической световой эффективности $V(\lambda)$ — см. раздел 8.5. Ординаты функции $V(\lambda)$ принято обозначаь как $\bar{y}(\lambda)$, поэтому уравнения расчета выглядят следующим образом:

$$x_{\mathrm{m}} = \frac{x_1 e_1 \bar{y}_1/y_1 + x_2 e_2 \bar{y}_2/y_2 + x_3 e_3 \bar{y}_3/y_3 + \ldots}{e_1 \bar{y}_1/y_1 + e_2 \bar{y}_2/y_2 + e_3 \bar{y}_3/y_3 + \ldots}$$

$$y_{\mathrm{m}} = \frac{e_1 \bar{y}_1 + e_2 \bar{y}_2 + e_3 \bar{y}_3 + \ldots}{e_1 \bar{y}_1/y_1 + e_2 \bar{y}_2/y_2 + e_3 \bar{y}_3/y_3 + \ldots}$$

Однако поскольку координаты цветностей x, y, z монохроматических (т.е. спектрально-чистых) стимулов, которые, напомним, являются слагаемыми стимула исследуемого (закон аддитивности) соотносятся с трихроматическими кривыми Стандартного наблюдателя $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ по выражениям:

$$x_1 = \frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_1 + \bar{y}_1 + \bar{z}_1}$$

$$y_1 = \frac{\bar{y}_1}{\bar{x}_1 + \bar{y}_1 + \bar{z}_1}$$

$$z_1 = \frac{\bar{z}_1}{\bar{x}_1 + \bar{y}_1 + \bar{z}_1},$$

то $x_1/y_1 = \bar{x}_1/\bar{y}_1$ и т.д., и аналогично $x_2/y_2 = \bar{x}_2/\bar{y}_2$ и т.д., $z_1/y_1 = \bar{z}_1/\bar{y}_1$ и т.д. Следовательно, суммирование упрощается до:

$$S_{\mathrm{m}} x_{\mathrm{m}} = e_1 \bar{x}_1 + e_2 \bar{x}_2 + e_3 \bar{x}_3 + \ldots = X_{\mathrm{m}}$$

$$S_{\mathrm{m}} y_{\mathrm{m}} = e_1 \bar{y}_1 + e_2 \bar{y}_2 + e_3 \bar{y}_3 + \ldots = Y_{\mathrm{m}}$$

$$S_{\mathrm{m}} z_{\mathrm{m}} = e_1 \bar{z}_1 + e_2 \bar{z}_2 + e_3 \bar{z}_3 + \ldots = Z_{\mathrm{m}}$$

$$S_{\mathrm{m}} = e_1 \bar{y}_1/y_1 + e_2 \bar{y}_2/y_2 + e_3 \bar{y}_3/y_3 \ldots$$

Итак, мы видим, что предпочтительнее, когда физические параметры стимула представлены в радиометрических единицах (нежели в фотометрических) поскольку тогда появляется возможность использовать табулированные величины $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, то есть прописанные в уже упомянутых таблицах раздела П2.2 (2° Стандартный наблюдатель, диапазон от 380 до 780 нм, шаг — 10 нм).

Когда X_{m}, Y_{m}, Z_{m}и S_{m} вычислены, можно рассчитать величины x_{m}, y_{m}, z_{m}. Проверить же вычисление можно просуммировав полученные данные: в сумме должна получиться единица (разумеется, можно выполнить и индивидуальные проверки просуммировав X, Y и Z каждого монохромата: $X_1 + Y_1 + Z_1 = S_1$ и т.д.).

Альтернативной (и более практичной) является процедура проверки, при которой S_m полностью игнорируется, а x_m, y_m и z_m получаются из:

$$x_m = \frac{X_m}{X_m + Y_m + Z_m}$$

$$y_m = \frac{Y_m}{X_m + Y_m + Z_m}$$

$$z_m = \frac{Z_m}{X_m + Y_m + Z_m}$$

П2.1.2.1 Предметные стимулы

Когда речь идет о вычислении колориметрических показателей предметных стимулов, весьма полезно и удобно представлять спектрофотометрические данные в виде спектральных коэффициентов отражения или пропускания — $t(\lambda)$, в совокупности со спектральным распределением энергии осветителя — $E(\lambda)$. В этом случае $e(\lambda) = E(\lambda) \cdot t(\lambda)$. Колориметрическое вычисление при этом идет по следующей схеме:

$$X_m = E_1 t_1 \bar{x}_1 + E_2 t_2 \bar{x}_2 + E_3 t_3 \bar{x}_3 + \ldots$$

$$Y_m = E_1 t_1 \bar{y}_1 + E_2 t_2 \bar{y}_2 + E_3 t_3 \bar{y}_3 + \ldots$$

$$Z_m = E_1 t_1 \bar{z}_1 + E_2 t_2 \bar{z}_2 + E_3 t_3 \bar{z}_3 + \ldots$$

Соответствующие значения x_m, y_m и z_m рассчитывают по схеме, описанной выше. Полный спектральный коэффициент отражения (пропускания) Y, взятый относительно идеального отражающего (или пропускающего) рассеивателя, рассчитывается по уравнению:

$$Y = \frac{E_1 t_1 \bar{y}_1 + E_2 t_2 \bar{y}_2 + E_3 t_3 \bar{y}_3 + \ldots}{E_1 \bar{y}_1 + E_2 \bar{y}_2 + E_3 \bar{y}_3 + \ldots},$$

знаменатель которого обозначим как F.

Если t-величины даны в процентах, то вышеприведенное уравнение дает величину Y также в процентах. Соответствующий набор трехстимульных значений при этом рассчитывается по следующим уравнениям:

$$X = X_m / F$$

$$Y = Y_m / F$$

$$Z = Z_m / F$$

Дабы упростить приведенные выше вычисления, в текущем Приложении дана таблица спектральных распределений энергии — $E(\lambda)$ — нескольких наиболее распространенных осветителей: S_A, S_B, S_C, D_{65}, а также планковского тела при 3250 К (представляющего спектральное распределение света, испускаемого вольфрамовой лампой кинопроектора), D_{55}(представляющего типичное освещение в солнечный день), D_{50}(представляющего слегка желтоватый дневной свет) и D_{75} (свет от северной части небосвода).

Часто возникает необходимость в расчете $u'v'$-координат цветности того или иного стимула, что выполняется по уравнениям:

$$u' = \frac{4x}{-2x+12y+3}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x+12y+3},$$

а также координат в CIELUV-пространстве:

$$L^* = 116\sqrt[3]{Y/Y_n} - 16$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n)$$

где Y_n, u'_n и v'_n — это соответственно Y-, u'- и v'-координаты эталонного белого стимула. Чтобы упростить вычисления, в таблицах данного Приложения даны $u'v'$-координаты различных осветителей, а также L^*-значения, соответствующие различным величинам Y/Y_n.

Цветовое отличие между двумя образцами, имеющими соответственно координаты $L_1^*u_1^*v_1^*$ и $L_2^*u_2^*v_2^*$ можно рассчитать по уравнению:

$$\sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (u_1^* - u_2^*)^2 + (v_1^* - v_2^*)^2}$$

П2.1.2.2 Рабочий пример

Сказанное проиллюстрируем примером. Задача: найти $L^*u^*v^*$-координаты отражающего образца, имея данные о его спектральном коэффициенте отражения — $t(\lambda)$ и спектральном распределении энергии осветителя (стандартный А-осветитель). Разумеется, вычисления удобнее всего выполнять на компьютере.

В таблице, прилагаемой к данному примеру (см. далее), находим, что:

$$X_m = 29540$$

$$Y_m = 38933$$

$$Z_m = 27930$$

$$100F = 107893,$$

следовательно:

$$x_m = \frac{X_m}{X_m + Y_m + Z_m} = \frac{29540}{96403} = 0.3064$$

$$y_m = \frac{Y_m}{X_m + Y_m + Z_m} = \frac{38933}{96403} = 0.4039$$

$$z_m = \frac{Z_m}{X_m + Y_m + Z_m} = \frac{27930}{96403} = 0.2897$$

Мы видим, что величины x_m, y_m и z_m в сумме дают единицу. Трехстимульные значения (XYZ) вычисляются, соответственно:

$$X = X_m / F = 29540/1078.93 = 27.38$$
$$Y = Y_m / F = 38933/1078.93 = 36.08$$
$$Z = Z_m / F = 227930/1078.93 = 25.89$$

Следовательно, если в роли эталонного белого выступает идеальный отражающей рассеиватель (у которого $Y = 100$), то $Y/Y_n = 36.08/100 = 0.3608$, и из таблицы L^*-значений мы получим $L^* = 66.58$.

Координаты цветности ($u'v'$) вычисляются по уравнениям:

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} = \frac{4(0.3064)}{-2(0.3064) + 12(4.039) + 3} = 0.1694$$
$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} = \frac{9(4.039)}{-2(0.3064) + 12(4.039) + 3} = 0.5025$$

Известно при этом, что $u'v'$-значения стандартного А-осветителя равны $u'_n = 0.2560$ и $v'_n = 0.5243$, и, следовательно:

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) = 13(66.58)(0.1694 - 0.2560) = -74.96$$
$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) = 13(66.58)(0.5025 - 0.5243) = -18.87$$

Если у некоего другого образца кривая спектрального коэффициента отражения несколько отлична от кривой первого образца, то под тем же А-осветителем мы получим:

$$u^* = -75.13$$
$$v^* = -16.54,$$
$$L^* = 62.31$$

и, следовательно, цветовое отличие между этими образцами будет равным:

$$\sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (u_1^* - u_2^*)^2 + (v_1^* - v_2^*)^2} =$$
$$\sqrt{(66.58 - 62.31)^2 + (-74.96 + 75.13)^2 + (-18.87 + 16.54)^2} =$$
$$\sqrt{18.23 + 0.03 + 5.43} = 4.87$$

Мы видим, что разница по светлоте дает наибольший вклад в общее цветовое отличие. Однако если образцы сравниваются не вплотную, т.е. не край в край, а на некотором расстоянии друг от друга, то доля разности по светлоте уменьшается и следует пользоваться следующим выражением:

$$\sqrt{(kL_1^* - kL_2^*)^2 + (u_1^* - u_2^*)^2 + (v_1^* - v_2^*)^2},$$

ТАБЛИЦА К ПРИМЕРУ П2.1

λ	$t(\lambda)$	$E(\lambda)$	$t(\lambda)E(\lambda)\bar{x}(\lambda)$	$t(\lambda)E(\lambda)\bar{y}(\lambda)$	$t(\lambda)E(\lambda)\bar{z}(\lambda)$	$100E(\lambda)\bar{y}(\lambda)$
380	51.3	9.80	1	0	3	0
390	56.2	12.09	3	0	14	0
400	60.5	14.71	13	0	60	1
410	66.5	17.68	51	1	244	2
420	72.5	20.99	205	6	982	8
430	75.3	24.67	527	22	2574	29
440	76.2	28.70	762	50	3821	66
450	75.9	33.09	844	95	4451	126
460	74.8	37.81	822	170	4721	227
470	73.4	42.87	615	286	4052	390
480	71.6	48.24	330	480	2808	671
490	69.5	53.91	120	779	1743	1121
500	66.7	59.86	20	1290	1086	1933
510	63.9	66.06	39	2123	668	3323
520	60.8	72.50	279	3130	345	5148
530	57.0	79.13	746	3888	190	6821
540	52.6	85.95	1313	4313	92	8200
550	48.0	92.91	1933	4437	39	9245
560	42.8	100.00	2544	4259	17	9950
570	37.0	107.18	3022	3775	8	10 204
580	30.6	114.44	3209	3047	6	9956
590	25.5	121.73	3186	2350	3	9215
600	20.9	129.04	2865	1702	2	8142
610	16.8	136.35	2297	1152	1	6858
620	12.9	143.62	1583	706	0	5472
630	10.0	150.84	969	400	0	3997
640	7.8	157.98	552	216	0	2765
650	6.7	165.03	313	118	0	1766
660	6.2	171.96	176	65	0	1049
670	5.9	178.77	92	34	0	572
680	5.4	185.43	47	17	0	315
690	4.9	191.93	21	8	0	157
700	5.0	198.26	11	4	0	81
710	6.2	204.41	7	3	0	43
720	9.3	210.36	6	2	0	21
730	17.4	216.12	5	2	0	11
740	27.5	221.67	4	1	0	4
750	42.7	227.00	3	1	0	2
760	56.2	232.12	3	1	0	2
770	66.1	237.01	2	0	0	0
780	76.0	241.68	0	0	0	0
Всего:			29 540	38 933	27 930	107 893

где k подбирается к каждому конкретному случаю.

$L^*a^*b^*$-формула цветовых отличий используется аналогичным путем (см. раздел 8.8).

П2.2 УРАВНЕНИЯ И ТАБЛИЦЫ

П2.2.1 Уравнения перехода между системами XYZ, UVW и $U'V'W'$

$$x = 1.5u/(u - 4v + 2) \qquad X = (3/2)U$$

$$y = v/(u - 4v + 2) \qquad Y = V$$

$$z = \frac{-0.5u - 5v + 2}{u - 4v + 2} \qquad Z = (3/2)U - 3V + 2W$$

$$u = u' \qquad U = (3/2)U'$$

$$v = 2/3v' \qquad V = V'$$

$$w = w' + 1/3v' \qquad W = (3/2)W' + 1/2V'$$

$$x = 9u'/(6u' - 16v' + 12) \qquad X = (9/4)U'$$

$$y = 4v'/(6u' - 16v' + 12) \qquad Y = V'$$

$$z = \frac{-3u' - 20v' + 12}{6u' - 16v' + 12} \qquad Z = (9/4)U' - 2V' + 3W'$$

$$u = 2x/(-x + 6y + 1.5) \qquad U = 2/3X$$

$$v = 3y/(-x + 6y + 1.5) \qquad V = Y$$

$$w = \frac{-3x + 3y + 1.5}{-x + 6y + 1.5} \qquad W = -1/2X + (3/2)Y + 1/2Z$$

$$u' = u \qquad U = 2/3X$$

$$v' = (3/2)v \qquad V = Y$$

$$w' = w - (1/2)v \qquad W = 2/3W - 1/3V$$

$$u' = 4x/(-2x + 12y + 3) \qquad U' = 4/9X$$

$$v' = 9y/(-2x + 12y + 3) \qquad V' = Y$$

$$w' = \frac{-6x + 3y + 3}{-2x + 12y + 3} \qquad W' = -1/3X + 2/3Y + 1/3Z$$

$$u = 4X/(X + 15Y + 3Z)$$

$$v = 6Y/(X + 15Y + 3Z)$$

$$u' = 4X/(X + 15Y + 3Z)$$

$$v' = 9Y/(X + 15Y + 3Z)$$

П2.2.2 Уравнения перехода между системами $U^*V^*W^*$, $L^*u^*v^*$, $L^*a^*b^*$

$$U^* = 13W^*(u - u_n)$$
$$V^* = 13W^*(v - v_n)$$
$$W^* = 25\sqrt[3]{Y} - 17$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n)$$
$$v^* = 13L^*(v' - v'_n)$$
$$L^* = 116\sqrt[3]{Y/Y_n} - 16$$

$$a^* = 500(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n})$$
$$b^* = 200(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n})$$
$$L^* = 116\sqrt[3]{Y/Y_n} - 16$$

* * *

Переменные X_n, Y_n, Z_n, u_n, v_n, u'_n, v'_n — это величины X, Y, Z, u, v, u', v' *выбранного эталонного белого.*

В уравнении для W^* величину Y следует давать в процентах.

Цветовые отличия рассчитываются по уравнениям:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (k\Delta W^*)^2}$$
$$\Delta E^*_{uv} = \sqrt{(\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2 + (k\Delta L^*)^2} \quad ,$$
$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (k\Delta L^*)^2}$$

где коэффициент $k = 1$ по образцам, расположенным край в край, но может выбираться меньшим в иных ситуациях. Когда $Y/Y_n < 0.008856$, $L^* = 903.3\,Y/Y_n$.

Если какое-либо из отношений X/X_n, Y/Y_n или Z/Z_n окажется равным 0.008856, то корнекубические выражения по a^* и b^* заменяются на:

$$7.787F + 16/116,$$

где F — это X/X_n, Y/Y_n или Z/Z_n.

П2.2.3 Таблицы

КООРДИНАТЫ ЦВЕТНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Осветитель	x	y	u	v	u'	v'
SA	0.4476	0.4074	0.2560	0.3495	0.2560	0.5243
3250 K	0.4201	0.3976	0.2424	0.3442	0.2424	0.5163
SB	0.3484	0.3516	0.2137	0.3234	0.2137	0.4851
SC	0.3101	0.3162	0.2009	0.3073	0.2009	0.4609
D50	0.3457	0.3585	0.2092	0.3254	0.2092	0.4881
D55	0.3324	0.3474	0.2044	0.3205	0.2044	0.4807
D65	0.3127	0.3290	0.1978	0 .3122	0.1978	0.4683
D75	0.2990	0.3149	0.1935	0.3057	0.1935	0.4585
SE	0.3333	0.3333	0.2105	0.3158	0.2105	0.4737
9300 K	0.2848	0.2932	0.1915	0.2957	0.1915	0.4436

ТРИХРОМАТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ СТАНДАРТНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ
И КООРДИНАТЫ ЦВЕТНОСТЕЙ МОНОХРОМАТОВ

λ (нм)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	x	y	u'	v'
380	0.0014	0.0000	0.0065	0.1741	0.0050	0.2569	0.0165
390	0.0042	0.0001	0.0201	0.1738	0.0049	0.2564	0.0163
400	0.0143	0.0004	0.0679	0.1733	0.0048	0.2558	0.0159
410	0.0435	0.0012	0.2074	0.1726	0.0048	0.2545	0.0159
420	0.1344	0.0040	0.6456	0.1714	0.0051	0.2522	0.0169
430	0.2839	0.0116	1.3856	0.1689	0.0069	0.2461	0.0226
440	0.3483	0.0230	1.7471	0.1644	0.0109	0.2347	0.0349
450	0.3362	0.0380	1.7721	0.1566	0.0177	0.2161	0.0550
460	0.2908	0.0600	1.6692	0.1440	0.0297	0.1877	0.0871
470	0.1954	0.0910	1.2876	0.1241	0.0578	0.1441	0.1510
480	0.0956	0.1390	0.8130	0.0913	0.1327	0.0828	0.2708
490	0.0320	0.2080	0.4652	0.0454	0.2950	0.0282	0.4117
500	0.0049	0.3230	0.2720	0.0082	0.5384	0.0035	0.5131
510	0.0093	0.5030	0.1582	0.0139	0.7502	0.0046	0.5638
520	0.0633	0.7100	0.0782	0.0743	0.8338	0.0231	0.5837
530	0.1655	0.8620	0.0422	0.1547	0.8059	0.0501	0.5868
540	0.2904	0.9540	0.0203	0.2296	0.7543	0.0792	0.5856
550	0.4334	0.9950	0.0087	0.3016	0.6923	0.1127	0.5821
560	0.5945	0.9950	0.0039	0.3731	0.6245	0.1531	0.5766
570	0.7621	0.9520	0.0021	0.4441	0.5547	0.2026	0.5694
580	0.9163	0.8700	0.0017	0.5125	0.4866	0.2623	0.5604
590	1.0263	0.7570	0.0011	0.5752	0.4242	0.3315	0.5501
600	1.0622	0.6310	0.0008	0.6270	0.3725	0.4035	0.5393
610	1.0026	0.5030	0.0003	0.6658	0.3340	0.4691	0.5296
620	0.8544	0.3810	0.0002	0.6915	0.3083	0.5202	0.5219
630	0.6424	0.2650	0.0000	0.7079	0.2920	0.5565	0.5165
640	0.4479	0.1750	0.0000	0.7190	0.2809	0.5830	0.5125
650	0.2835	0.1070	0.0000	0.7260	0.2740	0.6005	0.5099
660	0.1649	0.0610	0.0000	0.7300	0.2700	0.6108	0.5084
670	0.0874	0.0320	0.0000	0.7320	0.2680	0.6161	0.5076
680	0.0468	0.0170	0.0000	0.7334	0.2666	0.6200	0.5070
690	0.0227	0.0082	0.0000	0.7344	0.2656	0.6226	0.5066

ТРИХРОМАТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ СТАНДАРТНОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ
И КООРДИНАТЫ ЦВЕТНОСТЕЙ МОНОХРОМАТОВ

λ (нм)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	x	y	u'	v'
700	0.0114	0.0041	0.0000	0.7347	0.2653	0.6234	0.5065
710	0.0058	0.0021	0.0000	0.7347	0.2653	0.6234	0.5065
720	0.0029	0.0010	0.0000	0.7347	0.2653	0.6234	0.5065
730	0.0014	0.0005	0.0000	0.7347	0.2653	0.6234	0.5065
740	0.0007	0.0002	0.0000	0.7347	0.2653	0.6234	0.5065
750	0.0003	0.0001	0.0000	0.7347	0.2653	0.6234	0.5065
760	0.0002	0.0001	0.0000	0.7347	0.2653	0.6234	0.5065
770	0.0001	0.0000	0.0000	0.7347	0.2653	0.6234	0.5065
780	0.0000	0.0000	0.0000	0.7347	0.2653	0.6234	0.5065

L^* ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИНАХ Y/Y_n

Y/Y_n	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
1.00	100.00	100.04	100.08	100.12	100.15	100.19	100.23	100.27	100.31	100.35
.99	99.61	99.65	99.69	99.73	99.77	99.81	99.85	99.88	99.92	99.96
.98	99.22	99.26	99.30	99.34	99.38	99.42	99.46	99.50	99.53	99.57
.97	98.83	98.87	98.91	98.95	98.99	99.03	99.06	99.10	99.14	99.18
.96	98.43	98.47	98.51	98.55	98.59	98.63	98.67	98.71	98.75	98.79
.95	98.03	98.07	98.11	98.15	98.19	98.23	98.27	98.31	98.35	98.39
.94	97.63	97.67	97.71	97.75	97.79	97.83	97.87	97.91	97.95	97.99
.93	97.23	97.27	97.31	97.35	97.39	97.43	97.47	97.51	97.55	97.59
.92	96.82	96.86	96.90	96.94	96.98	97.02	97.07	97.11	97.15	97.19
.91	96.41	96.45	96.49	96.53	96.57	96.62	96.66	96.70	96.74	96.78
.90	96.00	96.04	96.08	96.12	96.16	96.20	96.25	96.29	96.33	96.37
.89	95.58	95.62	95.66	95.71	95.75	95.79	95.83	95.87	95.91	95.96
.88	95.16	95.20	95.25	95.29	95.33	95.37	95.41	95.45	95.50	95.54
.87	94.74	94.78	94.82	94.87	94.91	94.95	94.99	95.03	95.08	95.12
.86	94.31	94.36	94.40	94.44	94.48	94.53	94.57	94.61	94.65	94.70
.85	93.88	93.93	93.97	94.01	94.06	94.10	94.14	94.18	94.23	94.27
.84	93.45	93.49	93.54	93.58	93.62	93.67	93.71	93.75	93.80	93.84
.83	93.01	93.06	93.10	93.15	93.19	93.23	93.28	93.32	93.36	93.41
.82	92.57	92.62	92.66	92.71	92.75	92.80	92.84	92.88	92.93	92.97
.81	92.13	92.18	92.22	92.27	92.31	92.35	92.40	92.44	92.49	92.53
.80	91.68	91.73	91.77	91.82	91.86	91.91	91.95	92.00	92.04	92.09
.79	91.23	91.28	91.32	91.37	91.41	91.46	91.51	91.55	91.60	91.64
.78	90.78	90.83	90.87	90.92	90.96	91.01	91.05	91.10	91.14	91.19
.77	90.32	90.37	90.41	90.46	90.51	90.55	90.60	90.64	90.69	90.73
.76	89.86	89.91	89.95	90.00	90.04	90.09	90.14	90.18	90.23	90.28
.75	89.39	89.44	89.49	89.53	89.58	89.63	89.67	89.72	89.77	89.81
.74	88.92	88.97	89.02	89.06	89.11	89.16	89.21	89.25	89.30	89.35
.73	88.45	88.50	88.54	88.59	88.64	88.69	88.73	88.78	88.83	88.88
.72	87.97	88.02	88.06	88.11	88.16	88.21	88.26	88.30	88.35	88.40
.71	87.49	87.53	87.58	87.63	87.68	87.73	87.78	87.82	87.87	87.92
.70	87.00	87.05	87.09	87.14	87.19	87.24	87.29	87.34	87.39	87.44
.69	86.50	86.55	86.60	86.65	86.70	86.75	86.80	86.85	86.90	86.95
.68	86.01	86.06	86.11	86.16	86.21	86.26	86.31	86.36	86.40	86.45
.67	85.50	85.55	85.60	85.66	85.71	85.76	85.81	85.86	85.91	85.96
.66	85.00	85.05	85.10	85.15	85.20	85.25	85.30	85.35	85.40	85.45
.65	84.48	84.54	84.59	84.64	84.69	84.74	84.79	84.84	84.89	84.95

L^* ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИНАХ Y/Y_n

Y/Y_n	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
.64	83.97	84.02	84.07	84.12	84.17	84.23	84.28	84.33	84.38	84.43
.63	83.44	83.49	83.55	83.60	83.65	83.70	83.76	83.81	83.86	83.91
.62	82.91	82.97	83.02	83.07	83.13	83.18	83.23	83.28	83.34	83.39
.61	82.38	82.43	82.49	82.54	82.59	82.65	82.70	82.75	82.81	82.86
.60	81.84	81.89	81.95	82.00	82.06	82.11	82.16	82.22	82.27	82.32
.59	81.29	81.35	81.40	81.46	81.51	81.57	81.62	81.67	81.73	81.78
.58	80.74	80.79	80.85	80.91	80.96	81.02	81.07	81.13	81.18	81.24
.57	80.18	80.24	80.29	80.35	80.40	80.46	80.52	80.57	80.63	80.68
.56	79.61	79.67	79.73	79.78	79.84	79.90	79.95	80.01	80.07	80.12
.55	79.04	79.10	79.16	79.21	79.27	79.33	79.39	79.44	79.50	79.56
.54	78.46	78.52	78.58	78.64	78.69	78.75	78.81	78.87	78.93	78.98
.53	77.87	77.93	77.99	78.05	78.11	78.17	78.23	78.29	78.34	78.40
.52	77.28	77.34	77.40	77.46	77.52	77.58	77.64	77.70	77.76	77.82
.51	76.68	76.74	76.80	76.86	76.92	76.98	77.04	77.10	77.16	77.22
.50	76.07	76.13	76.19	76.25	76.31	76.38	76.44	76.50	76.56	76.62
.49	75.45	75.51	75.58	75.64	75.70	75.76	75.82	75.88	75.95	76.01
.48	74.82	74.89	74.95	75.01	75.08	75.14	75.20	75.26	75.33	75.39
.47	74.19	74.25	74.32	74.38	74.44	74.51	74.57	74.64	74.70	74.76
.46	73.55	73.61	73.68	73.74	73.80	73.87	73.93	74.00	74.06	74.13
.45	72.89	72.96	73.02	73.09	73.15	73.22	73.29	73.35	73.42	73.48
.44	72.23	72.30	72.36	72.43	72.50	72.56	72.63	72.69	72.76	72.83
.43	71.55	71.62	71.69	71.76	71.83	71.89	71.96	72.03	72.09	72.16
.42	70.87	70.94	71.01	71.08	71.15	71.21	71.28	71.35	71.42	71.49
.41	70.18	70.25	70.32	70.39	70.46	70.52	70.59	70.66	70.73	70.80
.40	69.47	69.54	69.61	69.68	69.75	69.82	69.89	69.97	70.04	70.11
.39	68.75	68.82	68.90	68.97	69.04	69.11	69.18	69.26	69.33	69.40
.38	68.02	68.09	68.17	68.24	68.31	68.39	68.46	68.53	68.61	68.68
.37	67.28	67.35	67.43	67.50	67.58	67.65	67.72	67.80	67.87	67.95
.36	66.52	66.60	66.67	66.75	66.82	66.90	66.98	67.05	67.13	67.20
.35	65.75	65.83	65.90	65.98	66.06	66.14	66.21	66.29	66.37	66.44
.34	64.96	65.04	65.12	65.20	65.28	65.36	65.44	65.51	65.59	65.67
.33	64.16	64.24	64.32	64.40	64.48	64.56	64.64	64.72	64.80	64.88
.32	63.34	63.43	63.51	63.59	63.67	63.75	63.84	63.92	64.00	64.08
.31	62.51	62.59	62.68	62.76	62.84	62.93	63.01	63.09	63.18	63.26
.30	61.65	61.74	61.83	61.91	62.00	62.08	62.17	62.25	62.34	62.42
.29	60.78	60.87	60.96	61.05	61.13	61.22	61.31	61.39	61.48	61.57
.28	59.89	59.98	60.07	60.16	60.25	60.34	60.43	60.52	60.60	60.69
.27	58.97	59.07	59.16	59.25	59.34	59.43	59.53	59.62	59.71	59.80
.26	58.04	58.13	58.23	58.32	58.41	58.51	58.60	58.70	58.79	58.88
.25	57.08	57.17	57.27	57.37	57.46	57.56	57.66	57.75	57.85	57.94
.24	56.09	56.19	56.29	56.39	56.49	56.58	56.68	56.78	56.88	56.98
.23	55.07	55.18	55.28	55.38	55.48	55.58	55.69	55.79	55.89	55.99
.22	54.03	54.13	54.24	54.34	54.45	54.55	54.66	54.76	54.87	54.97
.21	52.95	53.06	53.17	53.28	53.38	53.49	53.60	53.71	53.81	53.92
.20	51.84	51.95	52.06	52.17	52.29	52.40	52.51	52.62	52.73	52.84
.19	50.69	50.80	50.92	51.04	51.15	51.27	51.38	51.50	51.61	51.72
.18	49.50	49.62	49.74	49.86	49.98	50.10	50.22	50.33	50.45	50.57
.17	48.26	48.39	48.51	48.64	48.76	48.88	49.01	49.13	49.25	49.37
.16	46.97	47.11	47.24	47.37	47.49	47.62	47.75	47.88	48.01	48.13
.15	45.63	45.77	45.91	46.04	46.18	46.31	46.45	46.58	46.71	46.84

L^* ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИНАХ Y/Y_n

Y/Y_n	.000	.001	.002	.003	.004	.005	.006	.007	.008	.009
.14	44.23	44.38	44.52	44.66	44.80	44.94	45.08	45.22	45.36	45.50
.13	42.76	42.91	43.06	43.21	43.36	43.51	43.65	43.80	43.94	44.09
.12	41.22	41.37	41.53	41.69	41.84	42.00	42.15	42.31	42.46	42.61
.11	39.58	39.75	39.92	40.08	40.25	40.41	40.57	40.74	40.90	41.06
.10	37.84	38.02	38.20	38.38	38.55	38.73	38.90	39.07	39.24	39.41
.09	35.98	36.18	36.37	36.56	36.74	36.93	37.11	37.30	37.48	37.66
.08	33.98	34.19	34.40	34.60	34.80	35.00	35.20	35.40	35.60	35.79
.07	31.81	32.03	32.26	32.48	32.70	32.92	33.14	33.35	33.56	33.77
.06	29.41	29.66	29.91	30.16	30.40	30.64	30.88	31.11	31.35	31.58
.05	26.73	27.02	27.30	27.57	27.85	28.11	28.38	28.64	28.90	29.16
.04	23.67	24.00	24.32	24.64	24.95	25.26	25.56	25.86	26.16	26.45
.03	20.04	20.44	20.83	21.12	21.58	21.94	22.30	22.65	23.00	23.34
.02	15.49	16.00	16.50	16.99	17.46	17.92	18.36	18.80	19.22	19.64
.01	8.99	9.80	10.56	11.28	11.96	12.61	13.23	13.83	14.40	14.95

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ СТАНДАРТНЫХ ОСВЕТИТЕЛЕЙ

λ (нм)	S_A	3250 K	S_B	S_C	D_{50}	D_{55}	D_{65}	D_{75}
300	0.93				0.02	0.02	0.03	0.04
310	1.36				2.05	2.07	3.29	5.13
320	1.93		0.02	0.01	7.78	11.22	20.24	29.81
330	2.66		0.50	0.40	14.75	20.65	37.05	54.93
340	3.59		2.40	2.70	17.95	23.88	39.95	57.26
350	4.74		5.60	7.00	21.01	27.82	44.91	62.74
360	6.14		9.60	12.90	23.94	30.62	46.64	62.98
370	7.82		15.20	21.40	26.96	34.31	52.09	70.31
380	9.80	16.59	22.40	33.00	24.49	32.58	49.98	66.70
390	12.09	19.63	31.30	47.40	29.87	38.09	54.65	69.96
400	14.71	22.95	41.30	63.30	49.31	60.95	82.75	101.93
410	17.68	26.55	52.10	80.60	56.51	68.55	91.49	111.89
420	20.99	30.42	63.20	98.10	60.03	71.58	93.43	112.80
430	24.67	34.53	73.10	112.40	57.82	67.91	86.68	103.09
440	28.70	38.87	80.80	121.50	74.82	85.61	104.86	121.20
450	33.09	43.42	85.40	124.00	87.25	97.99	117.01	133.01
460	37.81	48.15	88.30	123.10	90.61	100.46	117.81	132.36
470	42.87	53.04	92.00	123.80	91.37	99.91	114.86	127.32
480	48.24	58.06	95.20	123.90	95.11	102.74	115.92	126.80
490	53.91	63.19	96.50	120.70	91.96	98.08	108.81	117.78
500	59.86	68.40	94.20	112.10	95.72	100.68	109.35	116.59
510	66.06	73.67	90.70	102.30	96.61	100.70	107.80	113.70
520	72.50	78.97	89.50	96.90	97.13	99.99	104.79	108.66
530	79.13	84.27	92.20	98.00	102.10	104.21	107.69	110.44
540	85.95	89.56	96.90	102.10	100.75	102.10	104.41	106.29
550	92.91	94.81	101.00	105.20	102.32	102.97	104.05	104.90
560	100.00	100.00	102.80	105.30	100.00	100.00	100.00	100.00
570	107.18	105.12	102.60	102.30	97.74	97.22	96.33	95.62
580	114.44	110.14	101.00	97.80	98.92	97.75	95.79	94.21
590	121.73	115.05	99.20	93.20	93.50	91.43	88.69	87.00
600	129.04	119.83	98.00	89.70	97.69	94.42	90.01	87.23

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ СТАНДАРТНЫХ ОСВЕТИТЕЛЕЙ

λ (нм)	S_A	3250 K	S_B	S_C	D_{50}	D_{55}	D_{65}	D_{75}
610	136.35	124.48	98.50	88.40	99.27	95.14	89.60	86.14
620	143.62	128.99	99.70	88.10	99.04	94.22	87.70	83.58
630	150.84	133.33	101.00	88.00	95.72	90.45	83.29	78.75
640	157.98	137.51	102.20	87.80	98.86	92.33	83.70	78.43
650	165.03	141.52	103.90	88.20	95.67	88.85	80.03	74.80
660	171.96	145.35	105.00	87.90	98.19	90.32	80.21	74.32
670	178.77	149.00	104.90	86.30	103.00	93.95	82.28	75.42
680	185.43	152.46	103.90	84.00	99.13	89.96	78.28	71.58
690	191.93	155.74	101.60	80.20	87.38	79.68	69.72	63.85
700	198.26	158.83	99.10	76.30	91.60	82.84	71.61	65.08
710	204.41	161.73	96.20	72.40	92.89	84.84	74.35	68.07
720	210.36	164.44	92.90	68.30	76.85	70.24	61.60	56.44
730	216.12	166.96	89.40	64.40	86.51	79.30	69.89	64.24
740	221.67	169.30	86.90	61.50	92.58	84.99	75.09	69.15
750	227.00	171.46	85.20	59.20	78.23	71.88	63.59	58.63
760	232.12	173.43	84.70	58.10	57.69	52.79	46.42	42.62
770	237.01	175.23	85.40	58.20	82.92	75.93	66.81	61.35
780	241.68			59.10	78.27	71.82	63.38	58.32
790	246.12				79.55	72.94	64.30	59.14
800	250.33				73.40	67.35	59.45	54.73
810	254.31				63.92	58.73	51.96	47.92
820	258.07				70.78	64.99	57.44	52.92
830	261.60				74.44	68.31	60.31	55.54

ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ СВЕТА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

λ (нм)	F_2 (низкий CRI)	F_7 (высокий CRI)	F_{11} (трехполосные)
380	1.92	4.15	1.23
390	3.66	7.69	0.96
400	12.36	18.09	7.81
410	13.56	20.57	8.92
420	8.37	15.43	5.02
430	24.86	35.42	23.12
440	32.44	45.27	32.58
450	13.24	23.97	14.23
460	14.36	26.09	13.34
470	15.05	27.37	10.92
480	15.27	27.85	15.21
490	15.15	27.60	26.59
500	14.58	26.87	10.36
510	14.15	26.16	3.18
520	14.42	25.54	1.86
530	16.22	24.90	4.05
540	26.89	33.18	78.46
550	36.38	38.03	72.79
560	32.24	25.16	7.57
570	38.14	26.92	4.87
580	43.17	30.90	20.88

590	37.16	25.31	24.98
600	33.00	24.35	17.06
610	27.58	23.22	81.42
620	21.95	22.28	41.05
630	16.88	21.45	21.40
640	12.69	20.34	5.80
650	9.41	20.10	11.00
660	6.94	19.25	5.05
670	5.12	14.81	3.27
680	3.80	11.75	3.09
690	2.98	10.02	3.57
700	2.27	8.28	4.00
710	1.76	6.88	8.89
720	1.36	5.51	1.97
730	1.13	4.52	0.47
740	1.02	3.81	0.46
750	0.93	3.27	0.44
760	0.92	2.88	0.57
770	0.80	2.33	0.35
780	0.43	1.31	0.15
x	0.3721	0.3129	0.3805
y	0.3751	0.3292	0.3769
u'	0.2203	0.1979	0.2251
v'	0.4996	0.4685	0.5017
CCT	4230 K	6500 K	4000 K
CRI (R_a)	64	90	83

П3 ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

П3.1 СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ЕДИНИЦАМИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ

	Канделы на кв. фут	Канделы на кв. дюйм	Канделы на кв. метр	Канделы на кв. см	Фут-ламберты (эквивалентны фут-канделам)	Ламберты	Миллиламберты
1 кандела на кв. фут =	1	$1/144$	3.2812	$10.76/100^2$	π	$\pi/929$	$\pi/0.929$
		0.00694	10.76	0.001076	3.142	0.003382	3.382
1 кандела на кв. дюйм =	122	1	144×10.76	$1550/100^2$	144	$144\pi/929$	$144\pi/0.929$
	144		1550	0.1550	452.4	0.4871	487.1
1 кандела на кв. метр (1 нит) =	0.3048^2	$0.3048^2/144$	1	$1/10\,000$	0.0929π	$\pi/10\,000$	$\pi/10$
	0.0929	0.0006451		0.0001	0.2919	0.0003142	0.3142
1 кандела на кв. см (1 стильб)	929	$929/144$	10 000	1	929π	π	1000π
		6.451			2919	3.142	3142
1 фут-ламберт (1 фут-кандела)	$1/\pi$	$1/144\pi$	$10.76/\pi$	$0.001076/\pi$	1	$1/929$	$1/0.929$
	0.3183	0.002210	3.426	0.0003426		0.001076	1.076
1 ламберт	$929/\pi$	$929/144\pi$	$10\,000/\pi$	$1/\pi$	929	1	1000
	295.7	2.053	3183	0.3183			
1 миллиламберт (10 апостильбов)	$0.929/\pi$	$0.929/144\pi$	$10/\pi$	0.0003183	0.929	$1/1000$	1
	0.2957	0.002053	3.183			0.001	

П3.2 СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ЕДИНИЦАМИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ И ОСВЕЩЕННОСТИ

Фотометрическая яркость поверхности при коэффициенте яркости β и освещенности E:

$L = E\beta/\pi$ кандел на кв. метр, когда E измерена в люксах (люменах на кв. метр).

$L = E\beta/\pi$ кандел на кв. фут, когда E измерена в люменах на кв. фут (фут-канделах).

$L = E\beta$ фут-ламбертов, когда E измерена в люменах на кв. фут (фут-канделах).

$L = E\beta/10$ миллиламбертов, когда E измерена в люксах (люменах на кв. метр).

$L = E\beta$ апостильбов, когда E измерена в люксах (люменах на кв. метр).

П3.3 НЕКОТОРЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ КОНВЕРСИИ

ВЕЛИЧИН ОСВЕЩЕННОСТИ

Из	*в*	*коэффициент умножения*
фут-кандел (люмен/фут^2)	люксы (люмены/м^2)	10.76
люксов (люмен/м^2)	фут-канделы (люмены/фут^2)	0.0929

ВЕЛИЧИН ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ

Из	*в*	*коэффициент умножения*
фут-ламбертов	канделы/м^2	3.426
кандел/м^2	фут-ламберты	0.2919
фут-ламбертов	миллиламберты	1.076
миллиламбертов	фут-ламберты	0.929
фут-ламбертов	апостильбы	10.76
апостильбов	фут-ламберты	0.0929
кандел/м^2	апостильбы	3.142
апостильбов	канделы/м^2	0.3183

СООТНОШЕНИЯ

Фотометрическая яркость (кд/м^2) = освещенность (лк)×коэффициент яркости/π

Фотометрическая яркость в апостильбах = освещенность (лк)×коэффициент яркости

П3.4 ТИПИЧНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ЯРКОСТИ И ОСВЕЩЕННОСТИ

	ОСВЕЩЕННОСТЬ (лк)			Ф/М ЯРКОСТЬ*(кд/м^2)		
Яркое солнце	50 000	—	100 000	3000	—	6000
Солнце в дымке	25 000	—	50 000	1500	—	3000
Высокие облака	10 000	—	25 000	600	—	1500
Пасмурно	2000	—	10 000	120	—	600
Небо в густых низких тучах	100	—	2000	6	—	120
Рассвет/закат	1	—	100	0.06	—	6
Полная луна	0.01	—	0.1	0.0006	—	0.006
Звезды	0.000 1	—	0.001	6×10^{-6}	—	0.000 06
Операционная	5000	—	10 000	300	—	600
Витрины	1000	—	5000	60	—	300
Конструкторское бюро	300	—	500	18	—	30
Офис	200	—	300	12	—	18
Жилое помещение	50	—	200	3	—	12
Коридоры	50	—	100	3	—	6
Хорошо освещенная улица		20			1.2	
Плохо освещенная улица		0.1			0.006	

*При коэффициенте яркости 20% (средний коэффициент отражения типичных сцен).

П3.5 ТИПИЧНЫЕ ПРОЕКЦИОННЫЕ ОСВЕЩЕННОСТИ

Тип проектора	Тип лампы	Мощность лампы	Световая эффективность лампы (люмен/Вт)	Световой поток лампы (люмены)	Световой поток проектора (люмены)	Эффективность (%)	Ширина изображения
16-мм кинопроектор	ВЛН	500	25	12 500	500	4	1.6 м
35-мм слайд-проектор	ВЛН	250	25	6250	800	13	2.0 м
Эпидиаскоп	ВЛН	400	25	10 000	2000	20	3.2 м
Lкд-проектор со светоделителем	ВЛН	200	25	5000	100	2	0.7 м
Lкд-проектор со светоделителем	РТГ	575	80	46 000	5000	11	5.2 м
Lкд RGB-проектор	ВЛН	400	25	10 000	100	1	0.7 м

ВЛН — вольфрамовая лампа накаливания
РТГ — ртутно-галогенная лампа

Ширина изображений (в метрах) вычислена исходя из того, что при открытом кадровом окне фотометрическая яркость экрана с коэффициентом отражения 80% составляет 50 кд/м^2. Треть от этой яркости (т.е. примерно 17кд/м^2) — это минимум, подходящий цветным изображениям; тройная яркость (т.е. 150 кд/м^2) — оптимум. Первые три позиции таблицы иллюстрируют тот факт, что чем меньше формат, тем ниже эффективность проектора.

П4 ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

П4.1 СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТО- И КИНОПЛЕНОК

ASA/ISO	DIN	BS log	Weston I и II
10	11	21	8
12	12	22	10
16	13	23	12
20	14	24	16
25	15	25	20
32	16	26	24
40	17	27	32
50	18	28	40
64	19	29	50
80	20	30	64
100	21	31	80
125	22	32	100
160	23	33	125
200	24	34	160
250	25	35	200
320	26	36	240
400	27	37	320
500	28	38	400
640	29	39	500
800	30	40	640
1000	31	41	800
1250	32	42	1000
1600	33	43	1250
2000	34	44	1600
2500	35	45	2000
3200	36	46	2400
4000	37	47	3200
5000	38	48	4000
6400	39	49	5000
8000	40	50	6400
10 000	41	51	8000

Верная экспозиция при съемке типичной солнечной сцены равна 1/ASA секунды при $f/16$, где ASA — это светочувствительность фотоматериала по ASA-шкале (соответствующая диафрагма при «солнце в дымке» — f/11; при «высоких облаках» — f/8 и при «пасмурно» — f/5.6).

Чтобы достичь верной экспозиции при f/2.8 и выдержке в 1/50 с, уровень освещен-

ности сцены в люксах умноженный на ASA фотопленки должен быть равным 100000. К примеру, если светочувствительность фотопленки составляет 400 ASA, уровень освещенности должен быть равным 250 лк.

П4.2 ФОРМАТЫ КИНО- И ФОТОПЛЕНОК

ФОРМАТЫ КИНОПЛЕНОК (мм)

Пленка	Кадровое окно камеры	Кадровое окно проектора	Кинотелепроекционная установка под 4:3 TV	Кинотелепроекционная установка под 16:9 TV
8 мм	4.88×3.68	4.37×3.28		
Super 8	5.79×4.12	5.31×4.01		
9.5 мм		8.00×6.15		
16 мм	10.26×7.49	9.65×7.26	9.65×7.24	9.65×7.26 BS
			9.35×7.01	
Super 16, 1.66:1	12.35×7.42	12.05×7.26	9.80×7.35	12.20×6.86
			12.20×7.35	
Super 16, 16:9	12.35×7.42	12.05×7.26	9.15×6.86	12.20×6.86
			12.20×6.86	
35 мм academy 1.37:1	21.95×16.00	21.11×15.29	20.39×15.29	20.95×15.29 BS
			20.12×15.09	
35 мм 1.66:1	21.95×16.00	21.11×12.62	16.83×12.62	20.95×11.78 CT
			20.95×12.62	20.95×12.62 BS
35 мм 1.75:1 (16:9)	21.95×16.00	21.11×11.96	15.71×11.78	20.95×11.78
			20.95×11.78	
35 мм 1.85:1	21.95×16.00Rf	21.11×11.33	15.09×11.32	20.12×11.32 CS
			20.95×11.32	20.95×11.32 BT
35 мм 2.39:1	21.95×16.00	21.11×11.33	17.53×11.69	17.53×15.58 CS
35 anamorphic 2.35:1	21.95×18.59	20.96×17.35	20.95×1.53	20.95×17.53 BT
Super 35 мм 4:3	24.92×18.67	20.96×17.35	24.00×18.00	
Super 35 мм 16:9	24.92×18.67	20.96×17.35		24.00×13.50
Super 35 мм 3-перф.			18.00×13.50	24.00×13.50
65/70 мм	52.48×23.01	48.56×22.10		
Vistavision 1.96:1	37.72×25.17	36.02×18.35		
Vistavision 1.85:1	37.72×20.40	36.02×19.47		

ФОРМАТЫ ФОТОПЛЕНОК (мм)

Пленка	**Номинал**	**Рабочая площадь**
Дисковая	8.3×10.6	7.8×10.0
110 (карманная Instamatic)	12.9×17.0	12.0×15.8
Полукадровая 35 мм	18×24	17×23
APS	16.7×30.2	переменная
35 мм	24×36	23×34.5
828 (карманная)	28×40	27×39
126 (Instamatic)	28×28	28×28
Половинная 127	30×40	29×38
127 квадрат	40×40	39×39
127	40×65	39×60
Половинная 120 и половинная 620	45×60	40×56
120 и 620 квадрат	60×60	56×56
70 мм	60×90	56×72
120 and 620 ($2^1/_4$×$3^1/_4$ дюймов)	60×90	56×81
Четвертьпластина	82×108	80×105
9×12 см	90×120	87×117
4×5 дюймов	102×127	99×124
Полупластина	120×165	117×162
Целая	165×216	162×213
8×10 дюймов	203×254	200×251

П4.3 ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИНОФИЛЬМОВ

Формат	Кадр/с	Изображе-ний на фут	Фут в секунду	Метры в минуту	Звук относительно кадров	
					Оптическая дорожка	Магнитная дорожка
8 мм (немой)	16	80	0.2	3.66	—	—
8 мм (звуковой)	18	80	0.225	4.11	—	на 56 впереди
8 мм (звуковой)	24	80	0.3	5.48	—	на 56 впереди
Super 8 (немой)	18	72	0.25	4.56	—	—
Super 8 (звуковой)	24	72	0.33	6.08	на 22 впереди	на 18 впереди
16 мм (немой)	16	40	0.4	7.31	—	—
16 мм (звуковой)	24	40	0.6	10.97	на 26 впереди	на 28 впереди
35 мм (немой)	16	16*	1.0*	18.24	—	—
35 мм (звуковой)	24	16*	1.5*	27.36	на 21 впереди	на 28 позади
65 мм и 70 мм	24	12.8*	1.875*	34.20	—	на 24 позади

* Длина 35- и 70-мм кинопленок измеряется в фильм-футах.
1 фильм-фут = 11.968 дюйма.

П4.4 ДИАФРАГМЫ ОБЪЕКТИВОВ

Номинальное значение		Приблизительная относительная экспозиция	
f/32		1	
	f/26		1.5
f/22		2	
	f/18		3
f/16		4	
	f/13		6
f/11		8	
	f/9		12
f/8		16	
	f/6.3		25
f/5.6		32	
	f/4.5		50
f/4		64	
	f/3.2		100
f/2.8		128	
	f/2.2		200
f/2		256	
	f/1.6		400

Номинальное значение		Приблизительная относительная экспозиция	
f/1.4		512	
	f/1.1		800
f/1		1024	
	f/0.8		1600
f/0.7		2048	

П4.5 ВЕДУЩЕЕ ЧИСЛО ФОТОВСПЫШКИ

Ведущее число фотовспышки (G) позволяет рассчитать значение диафрагмы (отношение фокусного расстояния объектива к его диаметру), которое необходимо выбрать, чтобы получить верную экспозицию при данном расстоянии от камеры до объекта съемки.

Ведущее число есть произведение расстояния (d) и значения диафрагмы (n):

$$G = nd.$$

Ведущее число пропорционально корню квадратному из светочувствительности фотопленки, к примеру: если чувствительность выросла в четыре раза, то ведущее число вырастет в два раза, и, следовательно, при неизменной диафрагме вдвое вырастет расстояние от камеры до объекта съемки.

Ведущее число вычисляется по следующему уравнению:

$$G = \sqrt{0.004LtRS},$$

где L — это максимальный световой поток в люменах, t — экспозиционная выдержка в секундах, R — коэффициент отражателя (который обычно равен 7, но может быть меньшим, к примеру 3, или большим, к примеру — 15), S — ASA/ISO-чувствительность фотоматериала.

У вспышек со встроенным отражателем уравнение расчета G выглядит так:

$$G = \sqrt{0.05EtS},$$

где E — эффективный световой поток, измеренный фотометром по полному углу отражателя).

П5 УЛУЧШЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ЦВЕТОВЫХ ОТЛИЧИЙ

П5.1 ВВЕДЕНИЕ

Формула цветовых отличий CIE94 (см. раздел 8.8) представляет собой модифицированное уравнение цветовых отличий CIELAB 1976 и примечательна тем, что она снижает весовое участие C^*_{ab} и H^*_{ab} в цветовом отличии по мере роста величины C^*_{ab}.

П5.2 ФОРМУЛА ЦВЕТОВЫХ ОТЛИЧИЙ CIE94

$$\Delta E^*_{CIE94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{k_H S_H}\right)^2},$$

где:

$S_L = 1$

$S_C = 1 + 0.045(C^*_{abS})$ или $S_C = 1 + 0.045\sqrt{(C^*_{ab1}C^*_{ab2})}$

$S_H = 1 + 0.015(C^*_{abS})$ или $S_H = 1 + 0.015\sqrt{(C^*_{ab1}C^*_{ab2})}$

Данное выражение вносит асимметрию, если стандарт и образец поменять местами

Альтернативное выражение, устраняющее асимметрию между ощущением от стимула 1 и ощущением от стимула 2

$k_C = 1$ в большинстве случаев

$k_H = 1$ в большинстве случаев

$k_L = 1$ в большинстве случаев

$k_L = 2$ в текстильном деле

П5.3 ФОРМУЛА ЦВЕТОВЫХ ОТЛИЧИЙ CMC (*l*:*c*)

$$\Delta E^*_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{lS_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{cS_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{S_H}\right)^2},$$

где:

$$S_L = \frac{0.040975L^*}{1+0.01765L^*};\ \text{если } L^* < 16, \text{ то } S_L = 0.511$$

$$S_Q = \frac{0.0638C^*_{ab}}{1+0.0131C^*_{ab}} + 0.638$$

$$S_H = (fT + 1 - f)S_C$$

где $f = \sqrt{\dfrac{(C^*_{ab})^4}{[(C^*_{ab})^4 + 1900]}}$ и $T = 0.36 + |0.4\cos(h_{ab} + 35)|$, но если $164° < h_{ab} < 345°$, то $T = 0.56 + |0.2\cos(h_{ab} + 168)|$.

Вертикальные скобки в уравнениях указывают на модуль величины (всегда положительное значение); коэффициенты l и c подобраны так, чтобы адекватно учесть доли светлоты и насыщенности в общем цветовом отличии. Когда требуется спрогнозировать *воспринимаемость* отличия между стимулами, l и c приравниваются к единице, и в этом случае формула выглядит как CMC (1:1).

Когда нужно предсказать *приемлемость* цветового отличия между стимулами, то коэффициентам l и c присваивается значение большее единицы.

П5.4 ФОРМУЛА CIEDE2000

Шаг 1

Вычисление CIELAB-координат цветового ощущения, а также показателя C^*_{ab} обычным путем:

$$L^* = \sqrt[3]{116(Y/Y_n)} - 16$$

$$a^* = 500\left(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n}\right)$$

$$b^* = 200\left(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n}\right)$$

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})}$$

Шаг 2

Вычисление a', C' и h':

$$L' = L^*$$

$$a' = (1 + \mathrm{G})a^*$$

$$b' = b^*$$

$$C' = \sqrt{a'^2 + b'^2}$$

$$h' = \arctan\frac{b'}{a'}$$

$$G = 0.5\left(1 - \sqrt{\frac{\overline{C}^{*\,7}_{ab}}{\overline{C}^{*\,7}_{ab} + 25^7}}\right),$$

где $\overline{C}^*_{ab}$ — среднее арифметическое из C^*_{ab}-значений эталонного и тестового образцов.

Шаг 3
Вычисление $\Delta L'$, $\Delta C'$ и $\Delta H'$:

$$\Delta L' = L'_b - L'_s$$
$$\Delta C' = C'_b - C'_s$$
$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_b C'_s}\,\sin(\Delta h'/2),$$

где $\Delta h' = h'_b - h'_s$. Подстрочные индексы «b» и «s» означают соответственно «batch» и «standard» — «серийный» (тестовый) и «эталонный» образцы.

Шаг 4
Вычисление собственно CIEDE2000, ΔE_{00}:

$$\Delta E^*_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C}\frac{\Delta H'}{k_H S_H}}$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\overline{L'} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L'} - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0.045\overline{C'}$$

$$S_H = 1 + 0.015\overline{C'}T$$

$$T = 1 - 0.17\cos(\overline{h'} - 30°) + 0.24\cos(2\overline{h'}) + 0.32\cos(3\overline{h'} + 6°) - 0.20\cos(4\overline{h'} - 63°)$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C$$

$$\Delta\theta = 30\exp\left\{-\left[\frac{(\overline{h'} - 275°)}{25}\right]^2\right\}$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\overline{C'}^7}{\overline{C'}^7 + 25^7}},$$

где $\overline{L'}$, $\overline{C'}$ и $\overline{h'}$ — это средние арифметические из L'-, C'- и h'-значения эталонного и тестового образцов.

Отметим, что вычислять $\overline{h'}$ нужно с осторожностью, к примеру: если цветовой тон эталона и образца лежит между 90° и 300°, то среднее арифметическое окажется равным 195°, что сильно отлично от верных 15°. Решение вопроса о способе расчета $\overline{h'}$ принимается по модулю разности между углами цветового тона: если результирующая величина меньше 180°, то берется среднее арифметическое; если больше — то от большего угла отнимается 360°, после чего рассчитывается среднее арифметическое. В нашем примере: $300°–360° = –60°$, после чего $(90°+[–60°])/2$.

П6 CIECAM02 КАК МОДИФИКАЦИЯ CIECAM97S

П6.1 ВВЕДЕНИЕ

В 2000 г. модель CIECAM97s была пересмотрена. Новая версия модели получила название CIECAM02 (CIE, 2004) и отлична от предыдущей по следующим позициям:

— упрощена модель хроматической адаптации (новая модель получила название CAT02);

— значение N_c по тусклому окружению изменено с 1.1 на 0.9;

— использована спектрально-заостренная функция колбочкового псевдоотклика;

— шумовая константа в уравнении ахроматического отклика подобрана так, что ахроматический отклик равен нулю по стимулам, Y-значение которых равно нулю;

— коррелят чистоты цвета у стимулов постоянной цветности, но различной фотометрической яркости не меняет своей величины, что лучше согласуется с экспериментальными данными.

П6.2 ПРЯМОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАБОТЫ МОДЕЛИ

Перед началом вычислений необходимо выбрать из таблицы П6.1 величины c, N_c и F по соответствующему окружению (допустимо применять линейную интерполяцию этих величин при промежуточных величинах яркости окружений).

ТАБЛИЦА П6.1 Величины c, N_c и F по окружениям различной яркости

Окружение	c	N_c	F
Среднее	0.69	1.0	1.0
Тусклое	0.59	0.9	0.9
Темное	0.525	0.8	0.8

Шаг 1

Конверсия XYZ-значений образца в спектрально-заостренные колбочковые псевдочувствительности (RGB) с применением прямой матрицы CAT02 — M_{CAT02}:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = M_{CAT02} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$